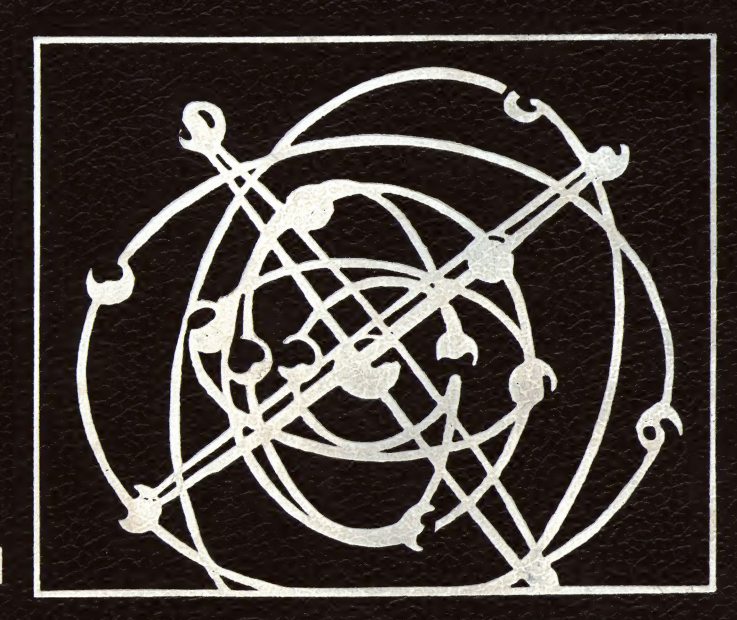
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

NDT





НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Б. Н. Епифанцев, Е. А. Гусев,
В. И. Матвеев, Ф. Р. Соснин

КНИГА 4 Контроль излучениями

Под редакцией проф. В. В. Сухорукова



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1992

ББК 32.87
Н44
УДК 534.86

Рекомендовано Государственным комитетом СССР по народному образованию для использования в учебном процессе студентами высших технических учебных заведений

Б. Н. Епифанцев, Е. А. Гусев, В. И. Матвеев, Ф. Р. Соснин

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. А. Воробьев (Московский автомобильно-дорожный институт); кафедра физических методов и приборов интроскопии Томского политехнического института (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В. Л. Чахлов)

Н44 **Неразрушающий** контроль. В 5 кн. Кн. 4. Контроль излучениями: Практ. пособие/Б. Н. Епифанцев, Е. А. Гусев, В. И. Матвеев, Ф. Р. Соснин; Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1992. — 321 с.: ил.
ISBN 5-06-002040-1

Изложены физические основы, методы и средства неразрушающего контроля с использованием ионизирующих, оптических, тепловых и радиоизлучений. Рассмотрено применение различных видов ионизирующих излучений для дефектоскопии сварных соединений, массивных деталей и узлов, изделий электроники, измерения толщины стального проката и тонких покрытий, а также оптического контроля состояния поверхности. Приведены сведения о тепловых (инфракрасных) методах и средствах контроля, о современной пирометрии, термографии и тепловыделении применительно к задачам дефектоскопии, а также о радиоволновых (СВЧ) методах и средствах неразрушающего контроля.

Н $\frac{2103000000(4309000000)-142}{001(01)-92}$ 139—91 ББК 32.87 6Ф2.7

ISBN 5-06-002040-1

Предисловие

В настоящей, четвертой книге серии «Неразрушающий контроль» систематизированно изложены вопросы теории и практики физических методов и средств контроля разнообразных объектов электромагнитными излучениями. Книга является логическим продолжением третьей книги серии — «Электромагнитный контроль», в которой рассмотрены магнитный, электрический и вихретоковый виды неразрушающего контроля (НК). Акустический (ультразвуковой) НК и НК проникающими веществами рассмотрены соответственно в книгах 2 и 1. Таким образом, с учетом данной книги охвачены все виды НК, предусмотренные ГОСТ 18353—79 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов».

Понятие «Контроль излучениями» объединяет радиоволновой, тепловой, оптический и радиационный виды контроля. Общим для всех этих видов контроля является использование единого носителя информации об объекте контроля (ОК). Таким носителем выступает электромагнитное излучение. Для целей НК нашли применение излучения с длиной волны от 1 м до 10^{-14} м (радиоволновые, инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-излучения). При взаимодействии излучения с ОК изменяются направление его распространения, мощность, поляризация и другие параметры. Эти изменения отражают эксплуатационные характеристики ОК (наличие несплошностей, соотношение размеров, физико-химические свойства) и позволяют предсказать вероятность отклонения названных характеристик от заданных в процессе эксплуатации изделия. Установление зависимостей, связывающих изменения параметров электромагнитного излучения с эксплуатационными характеристиками ОК при их взаимодействии, составляет содержание физических основ НК излучениями.

Одна часть информации, переносимая электромагнитным излучением, интересует потребителя; другая, отражающая, например, нестабильность первичного источника излучения, свойства среды распространения электромагнитной энергии, случайный характер границы раздела сред и т. д., маскирует первую. Чтобы сделать заключение о качестве ОК, необходимо преобразовать исходное информационное поле к виду, удобному для восприятия. В процессе преобразования следует позаботиться о

том, чтобы полезная информация терялась как можно меньше, а маскирующая (шумы) подавлялась. Эти вопросы, как и процесс принятия решений о качестве ОК, определяют предмет информационных основ НК (они рассмотрены в кн. 5 «Интроскопия и автоматизация контроля»).

Основное внимание в книге уделено физическим основам НК излучениями и техническим устройствам, позволяющим представить информацию об ОК в виде, удобном для восприятия оператором или пригодном для ввода в ЭВМ.

Книга предназначена студентам вузов, обучающимся по специальности «Физические методы и приборы интроскопии», и аспирантам, а также инженерам, занятым разработкой и эксплуатацией средств НК, технологией материалов, полуфабрикатов и изделий. Контрольные вопросы и задачи помогают использовать ее как учебное пособие, а многочисленные примеры применения методов и средств НК придают практическую направленность.

Для понимания представленного в книге материала достаточно знания курсов физики и математики в объеме технического вуза.

Главы 1, 3 написаны Б. Н. Епифанцевым, гл. 2 — В. И. Матвеевым, гл. 4 — Е. А. Гусевым и Ф. Р. Сосниным.

Авторы благодарят коллектив кафедры физических методов и приборов интроскопии Томского политехнического института, возглавляемый проф. В. Л. Чахловым, а также проф. В. А. Воробьева за труд по рецензированию рукописи книги.

Отзывы и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯМИ

§ 1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ

По современным представлениям электромагнитное излучение трактуется и как поток движущихся частиц, и как распространяющиеся в среде электромагнитные волны. В рамках первого представления хорошо объясняются явления взаимодействия электромагнитного излучения с объектом контроля и испускания им излучения, в рамках второго — процессы формирования изображения (интерференция, дифракция, отражение, преломление).

Современные представления о природе излучения в известной мере сложились под влиянием результатов исследований, полученных при изучении световых явлений. Первая попытка истолкования природы света была предпринята Ньютоном. В соответствии с его теорией свет представляет поток большого числа частиц (корпускул), испускаемых нагретым до определенной температуры телом. Отражение света трактовалось как отражение упругих шариков при ударе о плоскость, подчиняющееся закону равенства углов падения и отражения. Преломление объяснялось притяжением частиц преломляющей средой. Однако корпускулярная теория не могла объяснить наблюдаемые на практике явления интерференции и дифракции света.

В конце XVII в. Гюйгенс разработал волновую теорию, согласно которой свет представлялся в виде упругих волн, распространяющихся в особой среде — эфире. Введение понятия «эфир», имеющего несовместимые с законами механики свойства, не позволило дать непротиворечивое объяснение известной в то время совокупности оптических явлений.

В середине прошлого столетия Максвелл описал системой уравнений результаты экспериментальных открытий Фарадея в области электрических и магнитных явлений. На основе этих уравнений удалось доказать существование электромагнитных волн, установить законы их распространения в пространстве и сформулировать фундаментальное положение: свет является одним из видов электромагнитного излучения.

Электромагнитное излучение представляет быстроменяющиеся электрические и магнитные поля, распространяющиеся в вакууме со скоростью $c \simeq 3 \cdot 10^8$ м·с$^{-1}$. Они возникают при ускоренном движении электрических зарядов, что позднее было подтверждено опытами Герца. При изменении электрического поля формируется переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле. Возникнув в какой-либо области пространства, электромагнитное поле распространяется во все стороны в виде электромагнитных волн.

На рис. 1.1 изображена электромагнитная волна в момент времени t, где одна синусоида отражает колебания вектора напряженности **E** электрического поля, другая — вектора напряженности **H** магнитного поля. В каждой точке x изменение векторов **E**, **H** во времени происходит также по синусоидальному закону, т. е. волновой процесс распространяется во времени от точки к точке пространства с некоторой скоростью v и описывается уравнениями

$$E(x,\ t) = E_{z0}\ \sin\ 2\pi\nu\,(t - x/v),$$

$$H(x,\ t) = H_{y0}\ \sin\ 2\pi\nu\,(t - x/v), \qquad (1.1)$$

где E_{z0}, H_{y0} — модули векторов **E**, **H**; $\nu=(1/T_\nu)$ — частота; T_ν — период колебаний в точке x; $v=c(\varepsilon_r\mu_r)^{-0,5}$ — скорость распространения волны; ε_r и μ_r — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Длина волны $\lambda=vT$ связана с частотой соотношением $\lambda=v/\nu$ и есть расстояние, проходимое волной за время одного периода T_ν. Наряду с частотой ν часто пользуются круговой частотой $\omega=2\pi\nu$ или волновым числом $k_в=2\pi/\lambda$ [M^{-1}].

Величина $v=\lambda\nu=\omega/k_в$, характеризующая скорость распространения электромагнитной волны, называется *фазовой скоростью*. При распространении импульса электромагнитной энергии, который можно представить в виде суперпозиции волн вида (1.1), вводится понятие *групповой скорости* — скорости

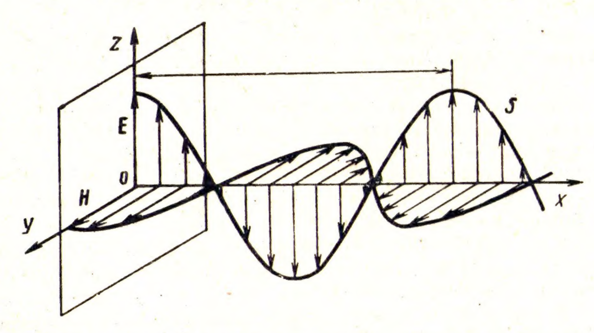


Рис. 1.1. Графическое представление монохроматической электромагнитной волны

перемещения максимума энергии в исследуемой группе волн: $v'=v-\lambda\partial v/\partial\lambda$. Эта формула получена Рэлеем и отражает зависимость скорости распространения гармонической волны в среде от длины волны λ. Эта зависимость называется *дисперсией волн*. Для некоторых комбинаций сред и длин волн $\partial v/\partial\lambda\simeq0$ и $v'=v$. В частности, при распространении световых волн в воздухе и воде дисперсия пренебрежимо мала. При прохождении света через стекло $\partial v/\partial\lambda>0$ и $v'<v$. Зависимость $v=f(\lambda)$ может быть использована для контроля состава веществ.

Электромагнитную волну, описываемую выражением (1.1), называют *монохроматической* (одноцветной) — ее период и начальная фаза не изменяются со временем. Если несколько электромагнитных волн имеют одинаковую частоту колебаний и постоянную разность фаз, они считаются *когерентными* (от лат. cohaerens — находящийся в связи).

Как видно из рис. 1.1, монохроматическая волна характеризуется наряду с длиной волны λ вектором **S** и положением плоскости колебаний вектора напряженности электрического поля в системе координат xyz. Вектор $\mathbf{S}=\mathbf{E}\times\mathbf{H}$ направлен под прямыми углами к векторам **E** и **H**, образует с ними правовинтовую систему и определяет направление переноса энергии электромагнитной волны. Перпендикулярность векторов **E**, **H**, **S** называется *условием поперечности* электромагнитной волны. Модуль вектора $|\mathbf{S}|$, называемого *вектором Умова — Пойнтинга*, пропорционален квадрату амплитуды напряженности электрического поля и характеризует плотность потока энергии (Вт/м²), переносимой в единицу времени через единичную площадку.

Положение электрического вектора в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, характеризует ее *поляризацию* (от греч. polos — ось, полюс). Если он не выходит за пределы плоскости (например, $z0x$ на рис. 1.1), волна считается плоско- или линейно поляризованной. Суперпозиция двух плоскополяризованных во взаимно перпендикулярных пло-

скостях волн, одинаковых по амплитуде и сдвинутых по фазе на 90°, образует волну, поляризованную по окружности (циркулярно). Вектор **E** непрерывно вращается вокруг направления распространения, описывая своим концом за каждый период полную окружность (рис. 1.2, *а*). При произвольных амплитудах и фазах суммарное колебание эллиптически поляризовано (рис. 1.2, *б*). С помощью анизотропных кристаллов можно выделить волны с определенной ориентацией вектора электрической напряженности.

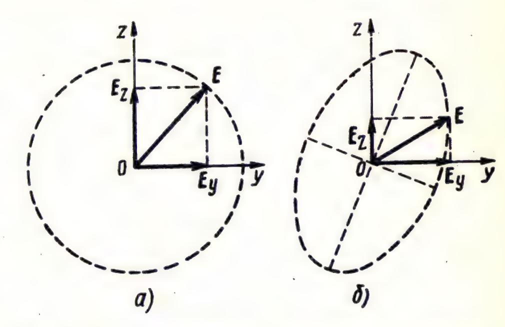


Рис. 1.2. Круговая (*а*) и эллиптическая (*б*) поляризация электромагнитной волны:

УФ — ультрафиолетовое излучение, ИК — инфракрасное излучение

Волновая природа электромагнитного излучения подтверждена многочисленными опытами, в которых наблюдались явления интерференции и дифракции. Явление *интерференции* (от лат. inter — взаимно, между собой и ferio — ударяю, поражаю) проявляется при наложении волн с одинаковыми периодами и состоит в усилении амплитуды результирующей волны в одних точках пространства и ослаблении ее в других. Если две когерентные волны с амплитудами E_0 прошли до встречи в некоторой точке различные пути x_1 и x_2, то результирующая волна

$$E = E_0\left[\sin 2\pi\left(\frac{t}{T_\nu} - \frac{x_1}{\lambda}\right) + \sin 2\pi\left(\frac{t}{T_\nu} - \frac{x_2}{\lambda} - \varphi\right)\right]$$

и соответственно ее амплитуда и фаза равны

$$E_p = 2E_0 \cos\left[\frac{\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) + \frac{\varphi}{2}\right],$$

$$\varphi_p = 2\pi\left(\frac{t}{T_\nu} - \frac{x_1 + x_2}{2\lambda}\right) - \frac{\varphi}{2},$$

где φ — начальная разность фаз.

Введем обозначение $\Delta = x_2 - x_1 = k\lambda$, $k = 0, 1, 2, ...$, и примем $\varphi = 0$. В точках встречи, до которых разность хода волн Δ равна целому числу, колебания оказываются в совпадающих фазах, и результирующая амплитуда возрастает. При $\Delta = (2k+1)\lambda/2$ колебания противофазные и результирующая амплитуда равна нулю. Возникает картина чередования максимумов и минимумов излучения, которую называют интерференционной.

Убедительным доводом в пользу волновой природы электромагнитного излучения служат также наблюдаемые в экспериментах явления отклонения хода лучей от направления прямолинейного распространения. В частности, если на пути лучей от точечного монохроматического источника света поставить маленький непрозрачный диск, то его изображение на удаленном экране окружено чередующимися темными и светлыми кольцами. Это явление, получившее название *дифракции* (от лат. diffractus — разломанный), объясняется на основе *принципа Гюйгенса — Френеля*, согласно которому результирующая волна является огибающей элементарных сферических волн, возбуждаемых приходящей волной в каждой точке пространства, до которой она доходит. Отсюда следует неизбежность отклонения лучей от прямоли-

нейного распространения при наличии преграды и интерференции вторичных волн, порождающей кольца вокруг проекции диска на экране.

Фундаментом волновой теории служат уравнения Максвелла и вытекающее из их решения соотношение $n=c/v=c\sqrt{\varepsilon_a\mu_a}$. Это соотношение связывает оптические (показатель преломления n), электрические (ε_a) и магнитные (μ_a) константы вещества. Из опыта известно, что $n=f(\lambda)$. Объяснение этому факту волновая теория, основанная на использовании макроскопических (интегральных) параметров электромагнитных свойств веществ, не дает. Область ее применения ограничена диапазоном радиоволн и частично диапазоном оптического спектра, т. е. когда длина волны заметно превышает межмолекулярные расстояния в исследуемом веществе.

Расширить границу применимости волновой теории в область коротковолновых излучений удается, привлекая электронную *теорию Лоренца*. Она базируется на идеализированной модели атома, согласно которой движение электронов в атоме подчиняется законам классической механики. В частности, считается, что на электрон действует квазиупругая сила, пропорциональная расстоянию до ядра, а не кулоновская, обратно пропорциональная квадрату указанного расстояния. Внешний электрон в атоме рассматривается как затухающий дипольный осциллятор, что не соответствует современной квантовой теории строения вещества.

В соответствии с электронной теорией под действием электромагнитного поля распространяющейся волны электроны и ионы среды начинают колебаться, становясь источниками электромагнитных волн. Вторичные волны налагаются на падающую волну, образуя результирующее поле в веществе. Такая модель позволила связать поглощение распространяющегося в среде излучения с длиной волны и получить результаты, достаточно хорошо совпадающие с наблюдаемыми экспериментально.

Сочетание волновой теории с теорией Лоренца приводит к успеху при решении большинства задач оптики. С переходом в более коротковолновую область спектра объяснение экспериментальных результатов удается получить лишь с привлечением *квантовой электродинамики*.

Согласно этой теории излучение рассматривается как совокупность движущихся частиц, называемых фотонами или квантами. Энергия каждого кванта $W_к$ связана с частотой ν (а не амплитудой E^2) через постоянную Планка h: $W_к=h\nu$, $h=6{,}626\cdot10^{-34}$ Дж·с (или $W_к=\hbar\omega$, $\hbar=h/2\pi$, $\omega=2\pi\nu$). Другой важной характеристикой кванта является импульс $P=\hbar k_в$. Частота ω и волновой вектор $k_в$ описывают волновые свойства монохроматического излучения, энергия $W_к$ и импульс P — корпускулярные.

Представление излучения в виде движущихся корпускул позволило объяснить долго остававшееся непонятным *явление фотоэффекта* — испускание электронов веществом под действием света. Энергия электромагнитной волны равномерно распределена по волновому фронту, и нетрудно подсчитать время облучения атома для накопления им энергии, достаточной для вырывания электрона. В условиях реального эксперимента оно может составлять недели. Однако на практике фотоэлектроны появляются сразу после облучения, что свидетельствует о пространственной локализации переносимой энергии, свойственной потоку частиц.

Гипотеза о квантовой природе излучения была выдвинута А. Эйнштейном в 1905 г. Согласно этой гипотезе свободный атом может находиться только в определенных дискретных состояниях, характеризующихся энергиями $W_{к1}$, $W_{к2}$, ... Переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно в результате поглощения или испускания кванта энергии $\hbar\omega=W_m-W_n$.

При поглощении падающего на вещество фотона его энергия передается одному электрону. Если она достаточна для освобождения электрона от удерживающих его связей, он может выйти за пределы вещества. Число освобожденных электронов пропорционально числу поглощенных фотонов. Последнее определяется частотой падающего излучения, а не его интенсив-

ностью (т. е. числом падающих фотонов). Этим объясняется наличие резкой частотной границы, с которой возможен фотоэффект.

Таким образом, конкретные явления могут быть объяснены с позиций волновой или квантовой природы электромагнитного излучения. Затруднения возникают в случае, когда мы пытаемся составить общее представление о природе излучения и с единых позиций объяснить разнообразные явления, с которыми приходится встречаться на практике. Эти затруднения сняты в современной квантовой теории излучения, трактующей классическую волновую картину как предельный случай проявления свойств большой совокупности квантов. Изложение основ квантовой теории выходит за рамки настоящего курса. При описании конкретных явлений будем пользоваться либо волновыми, либо корпускулярными представлениями, а также результатами так называемой полуклассической теории, описывающей излучение в виде электромагнитной волны, а структуру вещества — с помощью представлений квантовой механики.

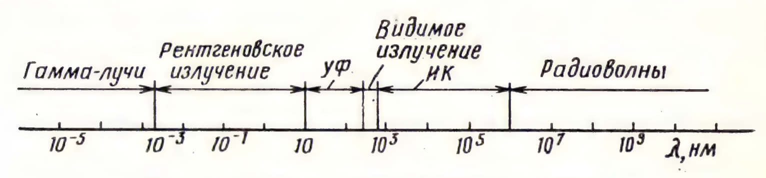


Рис. 1.3. Шкала электромагнитных волн

Видимый диапазон электромагнитных излучений ($\lambda = 0{,}38 \dots 0{,}76$ мкм) называется *светом.* К ним чувствителен глаз человека. За длинноволновой границей чувствительности зрительной системы простирается инфракрасный участок спектра (вплоть до 1000 мкм). *Инфракрасные лучи* оказывают тепловое воздействие на ОК. Почти половина энергии излучения Солнца приходится на эту область спектра.

Волны с длиной волны 12 ... 380 нм получили название *ультрафиолетовых.* К особенностям этого диапазона длин волн следует отнести их сильное поглощение обычным стеклом и воздухом.

В совокупности волны перечисленных диапазонов составляют область *оптических излучений.* Их источниками в повседневной жизни служат раскаленные тела. Электрическая дуга между электродами, электрический разряд в лампах высокого давления являются примерами источников в видимой и ближней ультрафиолетовых областях.

Электромагнитные волны с длиной волны $\lambda > 1$ мм относятся к области *радиоволн.* Диапазон радиоволн разбивается на несколько поддиапазонов: миллиметровые ($\lambda = 1 \dots 10$ мм или $\nu = 300 \dots 30$ ГГц), сантиметровые ($\lambda = 1 \dots 10$ см или $\nu = 30 \dots 3$ ГГц), дециметровые ($\lambda = 10 \dots 100$ см или $\nu = 3 \dots 0{,}3$ ГГц) и т. д. Радиоволны отражаются от металлов, а при распространении в диэлектриках ослабляются незначительно.

В 1915 г. Рентген открыл лучи, впоследствии названные его именем. *Рентгеновские лучи* испускаются при торможении в мишенях быстрых электронов и характеризуются длиной волны $\lambda = 0{,}004 \dots 12$ нм. Их особенностью является большая проникающая способность, они вызывают почернение фотографической эмульсии, фотоэффект, тепловые воздействия, свечение флуоресцирующего экрана.

В природе встречаются и более короткие волны — *гамма-лучи,* их длина волны составляет 0,004 нм и менее. Разнообразные радиоактивные вещества испускают гамма-лучи различной длины волны. Они могут возбуждаться при торможении ускоренных электронов в мишенях и характеризуются большой проникающей способностью.

На рис. 1.3 приведена шкала электромагнитных излучений, при этом указанные границы диапазонов условны и выбраны исходя из способов воз-

буждения и регистрации излучений. В общем случае частично они могут перекрываться.

Остановимся на единицах измерения электромагнитного излучения. При изучении оптического излучения с помощью глаза потребовалось ввести систему световых единиц, отражающую свойства зрения и поэтому пригодную только для узкой области спектра электромагнитных волн. Позднее с открытием и освоением инфракрасного и ультрафиолетового диапазона длин волн была создана обобщенная система энергетических единиц.

Исходным физическим понятием для построения системы энергетических единиц служит энергия, переносимая электромагнитной волной и измеряемая в джоулях (Дж). Скорость передачи энергии называют *потоком излучения* и измеряют в единицах мощности, например ваттах (Вт). При его отнесении к единичному интервалу длин волн получим производную единицу — *спектральную плотность потока излучения* Φ_λ (Вт/мкм).

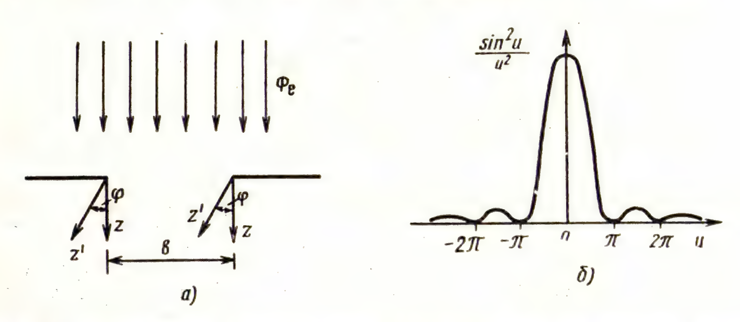


Рис. 1.4. К определению распределения плотности потока энергии излучения на выходе плоской щели

Величиной, аналогичной потоку излучения в системе световых единиц, является *световой поток* — мощность излучения, оцениваемая по его действию на человеческий глаз,

$$\Phi_v = \eta_m \int_0^\infty \Phi_\lambda \eta_\lambda d\lambda$$

и измеряемая в люменах (лм). Здесь η_λ — относительная спектральная чувствительность глаза; η_m — максимальное значение видности, определяемой как отношение светового потока к соответствующему потоку излучения. Принято, что световой поток 1 лм на длине волны $\lambda=0,555$ мкм соответствует потоку (1/680) Вт. Поэтому $\eta_m=680$ лм/Вт. Световой поток лампы накаливания мощностью 60 Вт в зависимости от ее типа колеблется в пределах 550 ... 750 лм.

Источники испускают излучения в различных направлениях неодинаково и характеризуются угловой плотностью потока, получившей название *силы излучения* (*света*):

$$I_e = d\Phi_e/d\Omega, \quad I_v = d\Phi_v/d\Omega, \tag{1.2}$$

где $d\Phi_e$ — поток излучения, распространяющийся в данном направлении внутри элементарного телесного угла $d\Omega$, содержащего это направление. Телесный угол определяется отношением площади dA', вырезаемой на поверхности сферы, к квадрату ее радиуса: $d\Omega = dA'/r^2$. Единицей телесного угла является стерадиан (ср), единицей силы излучения (света) — Вт/ср (лм/ср). В системе единиц СИ единицу силы света называют канделой (кд). Для

указанной выше лампы накаливания мощностью 60 Вт $I_v \simeq 55 ... 75$ кд (лм/ср).

Распределение потока излучения (светового потока) по поверхности источника называют *плотностью излучения* (светимостью), она выражается в единицах Вт/м² (лм/м²). В таких же единицах выражается *облученность (освещенность)* поверхности, на которую падает поток излучения (света), однако чтобы подчеркнуть отличие терминов «светимость» и «освещенность», для характеристики последней используется единица люкс (лк). Современные требования к освещенности письменных столов — 300 ... 500 лк.

Таблица 1.1

Энергетические и световые единицы измерения

Термин, обозначение, единица измерения в системе единиц		Определение
энергетической	световой	
Энергия излучения W, Дж	Энергия света W_v, лм·с	Энергия, переносимая электромагнитными волнами
Поток излучения Φ_e, Вт	Световой поток Φ_v, лм	Скорость передачи энергии излучения (света)
Спектральная плотность потока излучения Φ_λ, Вт/мкм	—	Поток излучения, отнесенный к единичному интервалу длин волн
Сила излучения I_e, Вт·ср$^{-1}$	Сила света I_v, лм·ср$^{-1}$	Лучистый (световой) поток в единичном телесном угле
Плотность излучения M_e, Вт·м$^{-2}$	Светимость M_v, лм·м$^{-2}$	Лучистый (световой) поток, излучаемый или отражаемый единицей площади поверхности
Облученность E_e, Вт·м$^{-2}$	Освещенность E_v, лм·м$^{-2}$ (лк)	Лучистый (световой) поток, падающий на единицу поверхности
Энергетическая яркость L_e, Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$	Яркость L_v, кд·м$^{-2}$ (нит)	Лучистый (световой) поток в единичном телесном угле с единицы площади

Из (1.2) следует $d\Phi_v = I_v d\Omega$. Подставляя в уравнение для освещенности $E_v = d\Phi_v/dA'$ выражение светового потока $d\Phi_v = I_v dA'/r^2$, т. е. освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника света.

Сила излучения (света) характеризует распределение потока по направлениям. Если отнести ее к единице излучающей поверхности, получаем новую единицу — *энергетическую яркость* (*яркость*), выражаемую в Вт/м²·ср (кд/м²). Приблизительные значения яркости различных источников составляют: экрана телевизора (уровень белого) 100 кд/м², люминесцентной лампы $(3-11) \cdot 10^3$ кд/м², ночного безлунного неба 10^{-4} кд/м².

Перечисленные термины, единицы и обозначения сведены в табл. 1.1. Они применяются для описания радиоволновых и оптических излучений. В области более высоких частот используется другая («фотонная») система единиц (табл. 1.2).

Между обеими системами единиц («волновой», табл. 1.1 и «фотонной», табл. 1.2) существует связь. Энергия излучения (Дж) соответствует энергии фотонов ($h\int\limits_{\nu} \nu d\nu$, Дж), поток излучения (Вт) — потоку частиц ($с^{-1}$), причем 1 Вт $= 5{,}0345 \cdot 10^{18}$ фотон·$с^{-1}$.

Таблица 1.2

Единицы измерения ионизирующего излучения

Величина, единица измерения	Обозначение	Определение
Поток ионизирующих частиц, 1/с	F	Число частиц, падающих на данную поверхность за единицу времени
Поток энергии частиц, Вт	F_{ω}	Суммарная энергия всех частиц, падающих на данную поверхность в единицу времени
Плотность потока ионизирующих частиц, 1/(м²·с)	φ_{u}	Отношение потока частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади ее поперечного сечения
Плотность потока энергии частиц, Вт/м²	φ_{ω}	Отношение потока энергии, проникающей в объем элементарной сферы, к площади ее поперечного сечения
Флюенс ионизирующих частиц, 1/м²	Φ	Отношение числа частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади ее поперечного сечения
Активность, Бк	A	Один распад в секунду
Поглощенная доза, Гр	D	Отношение средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме
Мощность поглощенной дозы, Гр/с	$\dot{D}$	Поглощенная доза в единицу времени
Эквивалентная доза излучения, Зв	X	Произведение поглощенной дозы излучения в биологической ткани на коэффициент качества излучения в данном элементе биологической ткани
Экспозиционная доза фотонного излучения, Кл/кг	X	Отношение суммарного заряда всех ионов одного знака, образовавшихся в заданном объеме воздуха, к массе воздуха в этом объеме
Керма, Гр	K	Кинетическая энергия, передаваемая электроном, на единицу массы поглотителя

Задачи

1.1.1. Определить вид кривой, описываемой концом вектора напряженности **E**, который представляет сумму двух волн вида (1.1):

$$E_{1z}(x,\ t) = E_{z0}\ \sin(\omega t - k_{в}x),\quad E_{1y} = E_{1x} = 0, \tag{1.3}$$

$$E_{2y}(x,\ t) = E_{y0}\ \sin(\omega t - k_{в}x + \varphi),\quad E_{2x} = E_{2z} = 0, \tag{1.4}$$

где φ — сдвиг фаз между колебаниями.

Решение

Для решения поставленной задачи выражение (1.4) полезно преобразовать к виду

$$E_{2y}(x,\ t) = E_{y0}\ \sin(\omega t - k_{\text{в}}x)\cos\varphi + E_{y0}\cos(\omega t - k_{\text{в}}x)\sin\varphi. \qquad (1.5)$$

Уравнение (1.3) используется для нахождения синусоидального и косинусоидального членов:

$$\sin(\omega t - k_{\text{в}}x) = E_{1z}/E_{z0},\quad \cos(\omega t - k_{\text{в}}x) = \sqrt{1-(E_{1z}/E_{z0})^2}. \qquad (1.6)$$

Подставляя (1.6) в (1.5), получаем

$$E_{2y} = E_{y0}(E_{1z}/E_{z0})\cos\varphi + E_{y0}\cdot\sin\varphi\sqrt{1-(E_{1z}/E_{z0})^2}. \qquad (1.7)$$

Если перенести первое слагаемое в правой части (1.7) на левую сторону, возвести обе части в квадрат и разделить их на E^2_{y0}, то после перегруппировки членов получим

$$(E_{1z}/E_{z0})^2 + (E_{2y}/E_{y0})^2 - 2(E_{2y}/E_{y0})\cdot(E_{1z}/E_{z0})\cos\varphi = \sin^2\varphi. \qquad (1.8)$$

Когда $\cos\varphi = 0$, а $E_{z0} \neq E_{y0}$, выражение (1.8) упрощается:

$$(E_{1z}/E_{z0})^2 + (E_{2y}/E_{y0})^2 = 1,$$

оно является уравнением эллипса с центром в начале координат и осями, направленными вдоль осей системы координат. Условие $\cos\varphi = 0$ соблюдается при $\varphi = \pi/2 + k\pi$, $k = 0,\ \pm1,\ \pm2, \ldots$. Подставляя $\cos y = 0$ в (1.3) и (1.4), получаем

$$E_z = E_{z0}\ \sin\omega t,\quad E_y = (-1)^{k+1}E_{y0}\cos\omega t.$$

Нетрудно видеть, что конец вектора $E = E_1\mathbf{e}_z + E_2\mathbf{e}_y$ ($\mathbf{e}_z$ и $\mathbf{e}_y$ — соответствующие орты) вращается по часовой стрелке при нечетном k (правая эллиптическая поляризованная волна) и в противоположном направлении при четном k (левая эллиптическая поляризация). При $E_{z0} = E_{y0}$ эллипс становится окружностью.

1.1.2. Определить характеристики E_z и E_y волны, являющейся суперпозицией право- и левополяризованной волн с одинаковой амплитудой:

$$E_{1z} = E_0\cos\omega t,\quad E_{1y} = E_0\ \sin\omega t;$$

$$E_{2z} = E_0\cos(-\omega t + \varphi),\quad E_{2y} = E_0\ \sin(-\omega t + \varphi).$$

Ответ:

$$E_z = 2E_0\cos(\varphi/2)\cos(\omega t - \varphi/2);$$

$$E_y = 2E_0\ \sin(\varphi/2)\cos(\omega t - \varphi/2).$$

1.1.3. Найти распределение плотности потока энергии излучения при суперпозиции двух линейно поляризованных волн:

$$E_1(t) = E_0\ \sin(\omega t - \varphi_1),\quad E_2(t) = E_0\sin(\omega t - \varphi_2). \qquad (1.9)$$

Решение

Используя формулу Эйлера $\exp(\pm j\psi) = \cos\psi \pm j\sin\psi$, действительная $\mathrm{Re}(\exp j\psi)$ и мнимая $I_m(\exp j\psi)$ части которой представляют тригонометрические функции $\cos\psi$ и $\sin\psi$ соответственно, представим (1.9) в виде

$$\dot{E}_1 = E_0\exp j(\omega t - \varphi_1),\quad \dot{E}_2 = E_0\ \exp j(\omega t - \varphi_2). \qquad (1.10)$$

Из курса электротехники известно, что плотность потока энергии монохроматической волны

$$J = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\,(\dot{E}^*\dot{E}) = \frac{1}{2}E_0^2, \quad (1.11)$$

где $\dot{E}^*$ — величина, комплексно-сопряженная $\dot{E}$ ($\dot{E}$ и $\dot{E}^*$ отличаются только знаком в показателе экспоненты).

В результате суперпозиции волн $\dot{E} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2$, $J = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\left(\dot{E}_1^* + \dot{E}_2^*\right) \times \right.$ $\left.\times \left(\dot{E}_1 + \dot{E}_2\right)\right] = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\dot{E}_1^*\dot{E}_1 + \dot{E}_2^*\dot{E}_2 + \dot{E}_1^*\dot{E}_2 + \dot{E}_2^*\dot{E}_1\right)$.

С учетом (1.10) $\dot{E}_1^*\dot{E}_1 = E_0^2$, $\dot{E}_2^*\dot{E}_2 = E_0^2$, $\dot{E}_1^*\dot{E}_2 = E_0^2 \exp \mathrm{j}\varphi$, $\dot{E}_2^*\dot{E}_1 = E_0 \times$ $\times \exp(-\mathrm{j}\varphi)$,

$$J = E_0^2(1 + \cos\varphi) = 2J_0(1 + \cos\varphi), \quad (1.12)$$

$\varphi = \psi_2 - \psi_1$; $J_0 = E_0^2/2$ — плотность потока энергии каждой из волн, интерференцию которых выражает формула (1.12).

1.1.4. Найти минимальную и максимальную плотности потока энергии интерферирующих волн $E_1(t) = E_{01}\sin(\omega t - \varphi_1)$, $E_2(t) = E_{02}\sin(\omega t - \varphi_2)$.

Ответ:

$$J_{min} = (\sqrt{J_1} - \sqrt{J_2})^2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1,$$

$$J_{max} = (\sqrt{J_1} + \sqrt{J_2})^2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1.$$

1.1.5. Установить характер распределения плотности потока энергии излучения на выходе плоской щели при облучении ее плоской монохроматической волной. Геометрия задачи показана на рис. 1.4, *а*.

Решение

Элементарный участок $\mathrm{d}x$ в направлении z' формирует волну $\mathrm{d}E_\varphi$ с амплитудой $E_0\mathrm{d}x/b$ (E_0 — амплитуда волны в направлении $\varphi = 0$ от всех элементов щели):

$$\mathrm{d}E_\varphi = \frac{E_0\mathrm{d}x}{b}\exp\left[\mathrm{j}\left(\omega t - k_{\text{в}}x\sin\varphi\right)\right]. \quad (1.13)$$

Интегрируя (1.13) по ширине щели, получаем

$$E_\varphi = \frac{E_0}{b}\exp(\mathrm{j}\omega t)\int_0^b \exp(-\mathrm{j}k_{\text{в}}x\sin\varphi)\,\mathrm{d}x =$$

$$= E_0\exp(\mathrm{j}\omega t) = \frac{\exp(-\mathrm{j}k_{\text{в}}\,b\sin\varphi) - 1}{-\mathrm{j}k_{\text{в}}b\sin\varphi}. \quad (1.14)$$

Амплитуда этой волны

$$E_{\varphi 0} = E_0\sin u/u, \quad u = 0{,}5\,k_{\text{в}}b\sin\varphi,$$

а плотность потока энергии

$$J_\varphi = J_0(\sin u/u)^2.$$

Как и следовало ожидать, плотность потока энергии максимальна в центре дифракционной картины. График функции $\sin^2 u/u^2$ изображен на рис. 1.4, *б*. Соотношение максимумов на графике $I_1 : I_2 : I_3 = 1 : 0{,}047 : 0{,}017$.

Полученный результат используется для вычисления распределения освещенности на выходе прямоугольного отверстия размером $a_п \times b_п$. Для этого необходимо проинтегрировать выражение (1.14) по ординате *y*. Угол φ попрежнему характеризует распределение плотности потока энергии по оси *x*, а угол ψ — по оси *y*. В результате вычислений по изложенному алгоритму имеем

$$J_{\varphi,\psi} = J_0 \left(\frac{\sin\ u_1}{u_1}\right)^2 \left(\frac{\sin\ u_2}{u_2}\right)^2,$$

$$u_1 = \pi b_п \sin(\varphi/\lambda), \quad u_2 = \pi a_п \sin(\psi/\lambda).$$

§ 1.2. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯМИ. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КОНТРОЛЯ

Разнообразие объектов контроля, широкий спектр параметров, по которым проводится их проверка на соответствие нормативной документации, многовариантность условий, подлежащих учету при практической реализации неразрушающих испытаний, предопределили многообразие методов и средств контроля, нашедших применение на практике. Среди них большую роль играют методы, основанные на использовании электромагнитных излучений.

Как известно [1], НК используется для решения задач дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики. Эффективность решения перечисленных задач существенно зависит от длины волны используемого излучения. На одной длине волны ОК прозрачен, на другой полностью отражает падающее на него излучение. В первом случае легко обнаруживаются непрозрачные включения, во втором несложно оценить качество обработки поверхности. Подобный перечень примеров можно было бы продолжить. Многообразие методов и средств НК в значительной мере обусловлено широким диапазоном длин волн используемых излучений, когда механизмы взаимодействия излучения с ОК могут различаться. По диапазону длин волн различают радиоволновые, тепловые, оптические и радиационные виды контроля излучениями.

В свою очередь, каждый вид контроля может быть реализован различными методами. Методы классифицируют по характеру взаимодействия излучения с ОК, используемым первичным информационным параметрам, способам получения первичной информации. По первому признаку перечисленные виды контроля реализуются общими методами: прошедшего и рассеянного (отраженного) излучения. Особенности взаимодействия излучения различных длин волн с ОК отражают методы: резонансный, индуцированного излучения, активационного анализа, характеристического излучения, автоэмиссионный.

Резонансный метод относится к радиоволновому виду НК и основан на регистрации параметров резонансных колебаний, возбужденных в ОК. В основу метода индуцированного излучения (оптического вида) положено испускание света внешними оболочками атомно-молекулярных систем при воздействии на них энергией (например, люминесценция). По существу близок метод характеристического излучения разных длин волн, испускаемого электронными оболочками атомов при воздействии на них потоком ионизирующих частиц. Выделяют также метод активационного анализа, когда регистрируются ионизирующие излучения наведенной радиоактивности в ОК, и автоэмиссионный, основанный на генерации ионизирующего излучения веществом без активации его в процессе контроля.

По классификационному признаку «первичные информационные параметры» радиоволновые и оптические методы контроля совпадают: амплитудный, фазовый, временной, частотный, поляризационный, геометрический, спектральный. Радиационный контроль осуществляется методом плотности потока энергии и спектральным.

По способу получения первичной информации методы классифицируют в зависимости от используемого детектора излучения: диод (детекторный метод), болометр, терморезистор, жидкий кристалл, термобумага, термолюминесцентный преобразователь, фотоупругая пластина, измеритель тепловых потоков (калориметрический метод), сцинтилляционный преобразователь (сцинтилляционный метод), ионизационная камера и счетчик Гейгера (ионизационный метод), радиографическая пленка (радиографический метод), флуоресцентный экран (радиоскопический метод). Они будут рассмотрены в последующих главах при описании видов контроля.

К методам, выделяемым по способу получения первичной информации, относят также интерференционный и голографический методы, позволяющие регистрировать фазовые соотношения между электромагнитными волнами: нефелометрический — плотность потока и поляризацию рассеянного излучения; рефлексометрический — плотность отраженного светового потока; метод вторичных электронов — поток электронов, образующийся в результате взаимодействия проникающего излучения с ОК. Несколько обособленную группу образуют рефрактометрический (измеряется показатель преломления ОК) и визуально-оптический (визуальное наблюдение либо наблюдение с помощью оптических приборов) методы.

В отличие от рассмотренных видов контроля тепловой контроль основан на регистрации и анализе температурного поля или тепловых потоков в ОК, и по используемым первичным параметрам различают термометрический и теплометрические методы. По способу получения первичной информации выделяют

пирометрический, оптический интерференционный, калориметрический и другие методы теплового контроля.

В радиоволновом контроле преимущественно находят применение излучения с длиной волны $\lambda=1 \dots 100$ мм. В основе методов лежат радиооптические процессы взаимодействия излучения с ОК (поглощение, дифракция, отражение, преломление), голографический метод, резонансные эффекты (электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс и т. д.). От металлов радиоволны полностью отражаются, диэлектрические, композитные, ферритовые и полупроводниковые материалы для них относительно прозрачны. Например, глубина просвечивания широкого класса строительных материалов на волне $\lambda=8$ мм составляет 50 ... 100 мм, на волне $\lambda=3$ см — 250 ... 600 мм [1].

Генерирование радиоволн осуществляется с помощью специальных приборов: магнетронов, клистронов, ламп обратной волны, лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна и т. д. Используемые мощности излучения в большинстве случаев НК ограничены диапазоном 10 мВт ... 1 Вт. Подробно перечисленные источники электромагнитного излучения будут рассмотрены в гл. 2. Здесь лишь отметим, что они представляют генератор, преобразующий энергию источника постоянного тока в электромагнитные колебания сверхвысокой частоты (СВЧ). Для приема волн СВЧ в приборах НК используются термоэлектрические индикаторы (термопары, терморезисторы, болометры) и выпрямляющие устройства (кристаллические детекторы), реагирующие на излучение мощностью порядка 10^{-12} Вт.

Радиоволновые методы находят применение для обнаружения в диэлектрических и полупроводниковых материалах дефектов типа нарушения сплошности, инородных включений, структурных неоднородностей. Неоднородность любого типа вызывает изменение параметров волны, прошедшей через материал или отраженной от него. Эти изменения позволяют обнаружить дефекты размером 1 ... 2 см^2 при толщине материала до 1 м. Радиоволновые методы используют также для контроля толщины диэлектрического слоя на металлических или диэлектрических покрытиях. При этом относительная погрешность измерения составляет 1 ... 3% или 50 ... 100 мкм на длине волны 3 см и 20 ... 30 мкм на длине волны 8 мм. Пределы контролируемых толщин колеблются от единиц до сотен миллиметров.

Задачи контроля таких параметров, как пористость, удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, влажность, вязкость, амплитуда вибраций, также решаются радиоволновыми методами.

Оптический контроль. При некоторых ограничениях на класс ОК перечисленные выше задачи решаются и с помощью опти-

ческих методов контроля. В отличие от радиоволновых оптические методы позволяют достичь значительно более высокой точности при контроле размеров; средства формирования оптических изображений сравнительно просты. Удается проконтролировать ряд новых ОК, испытания которых другими методами менее эффективны (например, в случае прозрачных для оптического излучения материалов).

Как уже отмечалось, область оптических излучений простирается от 12 нм до 1000 мкм. В практике НК используется в основном ограниченный диапазон длин волн $\lambda = 0{,}2 \ldots 14$ мкм) из-за значительного поглощения излучения длин волн $\lambda < 0{,}2$ мкм и $\lambda > 14$ мкм при их распространении в воздухе от источника излучения до ОК и от ОК до приемного устройства.

Источниками оптических излучений могут служить раскаленные тела, газоразрядные ламы, лазер (см. § 3.2).

Способы регистрации волн оптического диапазона основаны на измерении потока электромагнитного излучения. Для этой цели используются фотоэлектрические эффекты, реализованные в фотоэлементах, фотоумножителях, фоторезисторах и т. д., фотохимические эффекты (фотоэмульсии), термоэлектрические (болометры, терморезисторы), фотолюминесценция (люминесцирующие экраны).

В области длин волн 0,4 ... 0,7 мкм эффективным приемником излучения является глаз человека.

Кривые отражения, поглощения, рассеяния, полученные при изменении длины волны зондирующего излучения, позволяют судить о качестве продуктов питания, составе нефти, состоянии окружающей среды, структуре пластмасс и полимеров, концентрации частиц в растворах. Поляризованный свет широко используется в стекольной, химической, пищевой промышленности для определения внутренних напряжений в материалах, контроля состава растворов и т. д.

При **тепловых методах контроля** с использованием излучений источником информации выступает температурный рельеф (тепловое изображение) ОК. Поэтому нетрудно указать на ряд очевидных его приложений. Ошибки при производстве радиоэлектронной аппаратуры (установка недоброкачественных элементов, неверные соединения их между собой) приводят к изменению конфигурации температурного поля, формирующегося при подаче напряжения питания. На тепловом изображении наблюдаются локальные перегревы, позволяющие судить о качестве контактов, неоднородности электропроводящих слоев, нарушении теплового режима электронных компонентов. Динамика формирования теплового поля под капотом отражает соответствие размещения элементов и узлов автомобиля принятой конструкции. Если создать в ОК тепловой поток, то температурный рельеф будет отражать его внутреннюю структуру. Этот

принцип положен в основу тепловой дефектоскопии, контроля неоднородности теплофизических параметров.

Перечисленные примеры не исчерпывают всех областей применения оптического и теплового контроля, но позволяют оценить масштаб их использования в различных областях народного хозяйства.

При радиационном контроле используется область излучений с длиной волны от 10^{-2} до 10^{-8} мкм. С уменьшением длины волны в соответствии с формулой Планка ($W=h\nu$) энергия квантов растет и следует ожидать увеличения проникающей способности излучения. Обычно энергия гамма-квантов лежит в диапазоне от тысячных долей до 1 пДж. Большая проникающая способность ионизирующего излучения позволяет просвечивать стальные изделия толщиной до 700 мм.

В качестве источников излучения этого диапазона длин волн используют рентгеновские трубки, изотопы, ускорители. Для регистрации излучения применяют специальные приемники (детекторы), в основу работы которых положены различные явления, наблюдаемые при взаимодействии излучения с веществом: ионизация газов и твердых тел, флуоресценция неорганических и органических веществ, химические реакции, тепловой эффект, фотографическое действие. В зависимости от типа детектора вырабатываемый им сигнал может быть в виде постоянного электрического тока, короткого импульса, световой вспышки. На практике широкое распространение получили специальные фотографические пластинки (пленки), газоразрядные счетчики и сцинтилляционные счетчики, преобразующие энергию поглощенного кванта в энергию световой вспышки, регистрируемую, например, фотоумножителем.

Одним из основных классификационных признаков радиационных методов контроля является тип используемого детектора. При регистрации излучения с помощью радиографической пленки или заряженных полупроводниковых пластин метод называют радиографическим. Если радиационное изображение ОК преобразуется в световое с помощью радиационно-оптических преобразователей (основанных на использовании различных типов люминесценции материалов под действием ионизирующего излучения), метод контроля называют радиоскопическим. В качестве детекторов излучения при радиометрическом контроле используют различного рода счетчики, ионизационные камеры, сцинтилляционные преобразователи.

Преимущественная область применения радиационного контроля — дефектоскопия паяных и сварных соединений, литья, поковок, штампованных объектов и прочих изделий из металлов, их сплавов, пластмасс, керамики и т. д., а также толщинометрия стальных листов и металлических покрытий. При радиографии ОК должен быть зафиксирован в пространстве на время

экспозиции, при других методах возможен контроль движущихся объектов.

Краткая характеристика методов контроля излучениями позволяет сделать вывод о наличии функциональных элементов, присущих радиоволновым, оптическим, тепловым и радиационным методам. Этот вывод базируется на двух положениях; природа электромагнитного излучения едина, принципы выделения полезной информации на фоне помех одинаковы во всех методах и служат основой для составления общей схемы средств контроля.

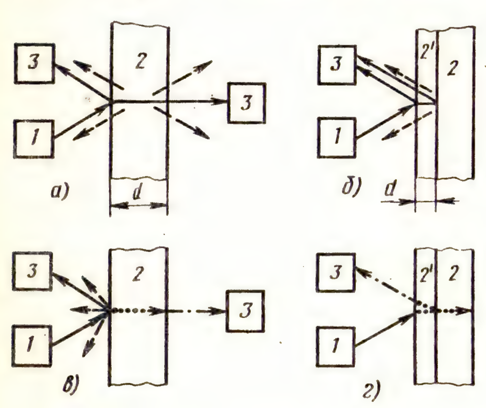


Рис. 1.5. Обобщенные схемы неразрушающих испытаний с использованием излучений

На рис. 1.5 представлены обобщенные схемы испытаний с использованием излучений. Они включают источник излучения *1* и приемное устройство *3*, расположение которых относительно ОК *2* имеет несколько вариантов.

В варианте на рис. 1.5, *а* реализуется контроль прозрачных материалов. При падении на ОК излучение частично отражается от его поверхности, частично проходит через него (сплошные линии). По степени ослабления прошедшего излучения при известной толщине ОК можно судить о физических параметрах поглотителя, и наоборот, по заданному коэффициенту поглощения материала и плотности потока излучений на входе и выходе оценивается толщина ОК. Наличие неоднородностей в ОК (дефектов) меняет пространственное распределение плотности потока излучения, что позволяет обнаруживать дефекты.

В процессе распространения излучения в ОК оно частично рассеивается на микронеоднородностях среды (штриховые линии). Наличие рассеянной составляющей затрудняет интерпретацию зарегистрированной информации при контроле «на просвет». В то же время для слабопрозрачных ОК или при одностороннем доступе к ним составляющая рассеянного излучения является основным носителем информации о параметрах ОК.

В варианте на рис. 1.5, *б* на непрозрачное тело *2* нанесено прозрачное покрытие *2'*. Типичные задачи контроля таких ОК сводятся к измерению толщины покрытия, обнаружению областей его несвязанности с основным материалом, оценке физических параметров изделия *2* и *2'*. Источником информации явля-

ется рассеянное отраженное излучение от внешней и внутренней поверхностей покрытия (его внутренних микронеоднородностей).

В случае непрозрачных (рис. 1.5, *в*) или многослойных непрозрачных ОК (рис. 1.5, *г*) падающее излучение поглощается в тонком поверхностном слое, одна его часть отражается зеркально (сплошная стрелка на рис. 1.5, *в*), другая — диффузно (штриховые стрелки). По этим составляющим можно судить лишь о свойствах поверхности, например о ее шероховатости, волнистости. Для контроля внутренней структуры ОК используются побочные эффекты, возникающие при взаимодействии излучения с ОК.

Поглощение излучения в приповерхностном слое ОК приводит к повышению его температуры. Под действием температурного градиента формируется тепловой поток (пунктирная стрелка на рис. 1.5, *в*) к противоположной поверхности, который изменяет температуру ОК. Поскольку любое тело при температуре выше абсолютного нуля излучает электромагнитную энергию (штрихпунктирная стрелка), с помощью подходящего приемного устройства *3* можно на расстоянии наблюдать изменения термодинамического состояния ОК.

Параметры теплового потока зависят от характеристик среды, в которой он распространяется. Если на пути этого потока встречается неоднородность, то условия распространения нарушаются и температурный рельеф поверхности изделия искажается. Наличие связи между параметрами регистрируемого теплового поля и внутренними характеристиками ОК лежит в основе теплового контроля. Описанный вариант известен в литературе под названием активного способа теплового контроля.

Чаще всего он применяется для контроля двухслойных изделий (рис. 1.5, *г*). Источник *1* испускает импульс излучения на поверхность слоя *2′* ОК. Равномерный тепловой поток, сформированный этим импульсом, распространяется к противоположной стороне ОК. Если в месте контакта разнородных слоев *2′-2* есть дефект (отслоение, непроклей), то в области дефекта происходит накопление тепла (что можно трактовать как отражение теплового потока от дефекта). На температурном рельефе поверхности формируется выброс, указывающий на наличие отслоения.

Те же задачи могут быть решены и в отсутствие внешнего источника энергии, если температура ОК отличается от температуры окружающей среды. Процесс выравнивания температур на этапе контроля приводит к возникновению тепловых потоков, которые формируют температурное поле на поверхности ОК, отражающее его внутреннюю структуру. Такой способ получил название пассивного. Его целесообразно применять для контроля тепловых режимов технологического оборудования (электриче-

ских двигателей, трансформаторов, блоков радиоэлектронной аппаратуры и т. д.) в процессе работы.

К рассмотренным на рис. 1.5 схемам сводится подавляющее большинство вариантов НК излучениями, встречающихся на практике. При детальном рассмотрении функций приемного устройства *3* также удается выделить элементы, характерные для всех видов контроля излучениями: радиоволнового, оптического, теплового и радиационного.

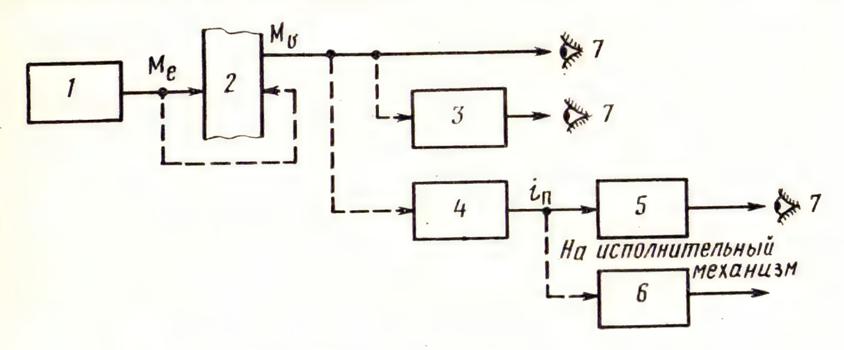


Рис. 1.6. Структурная схема контроля излучениями:

1 — источник излучения; *2* — контролируемый объект; *3* — преобразователь излучение — видимое изображение; *4* — преобразователь электромагнитного излучения в электрический сигнал; *5* — дисплей; *6* — автоматическое устройство принятия решений

Обратимся к структурной схеме (рис. 1.6). Наряду с источником излучения *1* и ОК *2* она включает устройства преобразования поля излучения *3, 4,* блок представления информации оператору *5,* автоматическое устройство принятия решений *6.* В большинстве случаев решение о качестве ОК принимается оператором — его зрительной системой *7.*

Можно непосредственно наблюдать глазом видимое излучение ОК. Это визуально-оптический контроль, применяемый для качественной оценки геометрии микро- и макрообъектов, обнаружения поверхностных дефектов непрозрачных и внутренних дефектов прозрачных для света ОК и др.

Возможности контроля существенно расширяются с введением в систему «ОК — глаз оператора» преобразователя *3* «излучение — видимое изображение». В простейшем случае в качестве такого преобразователя может выступать оптическая (линзовая) система, позволяющая изменить масштаб наблюдаемых изображений ОК.

Другой пример — использование гибких волоконных световодов для передачи светового поля из недоступных для непосредственного видения областей в область пространства, удобную для наблюдения. К этому же типу преобразователей следует отнести детекторы невидимых излучений: фоточувствитель-

ную пленку, радиационно-оптические приборы, флуоресцентные экраны, ионизационные камеры, сцинтилляционные преобразователи и т. д.

Еще более широкие возможности контроля открылись с разработкой преобразователей электромагнитного излучения в электрический сигнал *4* и электрического сигнала в видимое изображение *5*. Созданы преобразователи, чувствительные не только к видимому свету, но и к невидимым излучениям: инфракрасным, рентгеновским и т. д. Это позволило резко увеличить номенклатуру ОК и повысить достоверность принимаемых решений об их качестве. Скорость переработки воспринимаемой зрительной системой человека информации не всегда оказывается достаточной. Для проведения контроля в таких случаях необходимо автоматизировать процесс принятия решений с помощью блока *6* на рис. 1.6.

Блок *6* должен выполнять функции оператора, но за более короткое время. Речь идет об автоматизации уникальных умственных процессов — обнаружения и распознавания образов, оценки качества ОК. Подробно эти вопросы изложены в кн. 5.

Контрольные вопросы

1.2.1. Какие процессы наблюдаются при взаимодействии излучения с ОК? Чем отличаются основные эффекты взаимодействия от вторичных (сопутствующих) эффектов?

1.2.2. Для решения каких задач используется НК излучениями и отличаются ли эффекты взаимодействия излучения с ОК на разных длинах волн?

1.2.3. Как классифицируются виды контроля излучениями в зависимости от диапазона используемых длин волн?

1.2.4. Какие длины волн используются при радиоволновом, оптическом, тепловом и радиационном видах контроля?

1.2.5. Какие параметры ОК контролируются радиоволновыми, оптическими, тепловыми и радиационными методами?

1.2.6. Перечислите основные типы источников излучения, применяемых при проведении радиоволнового, оптического и радиационного контроля.

§ 1.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

В системах контроля излучениями на пути распространения электромагнитной волны могут встретиться несколько сред с различными физическими параметрами. После прохождения очередной границы раздела сред амплитуда, фаза, направление распространения и поляризация волны изменяются в зависимости от параметров контактирующих сред, одна из которых или несколько из них могут выступать в качестве ОК. Для установления количественной связи между параметрами электромагнитной волны, прошедшей через границу раздела двух сред, с ин-

тересующими параметрами ОК используют феноменологический подход, основанный на применении уравнений Максвелла.

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме для изотропной однородной линейной среды имеют вид:

$$\text{rot}\ \mathbf{H}=\nabla\times\mathbf{H}=\gamma\mathbf{E}+\varepsilon_a\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}, \quad (1.15)$$

$$\text{rot}\ \mathbf{E}=\nabla\times\mathbf{E}=-\mu_a\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}, \quad (1.16)$$

$$\text{div}\ \mathbf{E}=\nabla\mathbf{E}=0, \quad (1.17) \qquad \text{div}\ \mathbf{H}=\nabla\mathbf{H}=0, \quad (1.18)$$

где $\nabla=\mathbf{i}\frac{\partial}{\partial x}+\mathbf{j}\frac{\partial}{\partial y}+\mathbf{k}\frac{\partial}{\partial z}$ — дифференциальный оператор; $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ — векторы напряженности электрического и магнитного полей; ε_a и μ_a — абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемости; γ — удельная электрическая проводимость, См/м.

Суть процессов, описываемых этими уравнениями, становится ясной при рассмотрении предельных случаев. Для идеального диэлектрика $\gamma\to 0$ и членом $\gamma\mathbf{E}$ в уравнении (1.15) можно пренебречь. При неизменных параметрах волны по координатам y, z: $\partial/\partial y=\partial/\partial z=0$. Комбинируя уравнения для этих условий с целью исключения составляющих магнитного поля, получаем

$$\mu_a\varepsilon_a\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}, \quad (1.19) \qquad \mu_a\varepsilon_a\frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2}. \quad (1.20)$$

Уравнения (1.19) и (1.20) описывают распространение в направлении x составляющих напряженности электрического поля по осям y, z. Если положить далее, что вектор $\mathbf{E}$ расположен только в плоскости $z0x$, то составляющая E_y и ее производные равны нулю, а единственной зависящей от времени является составляющая E_z, определяемая уравнением (1.20). Общее решение этого уравнения

$$E_z=f\left(x-t/\sqrt{\mu_a\varepsilon_a}\right)+q\left(x+t/\sqrt{\mu_a\varepsilon_a}\right), \quad (1.21)$$

где $f(\ldots)$ и $q(\ldots)$ — любые дифференцируемые функции, описывающие распространение волны соответственно в положительном и отрицательном направлении x; $1/\sqrt{\mu_a\varepsilon_a}=v$ — скорость распространения волны. Функцию $f(\ldots)$ в (1.21) можно представить рядом Фурье как суперпозицию монохроматических волн с различными амплитудами и фазами (см. рис. 1.1). Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только монохроматическую волну с нулевой начальной фазой $f(\ldots)=\dot{E}_z=E_{z0}\exp[\mathrm{j}\omega(t-x/v)]$ или, вводя *показатель преломления* $n=c/v=\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}$,

$$\dot{E}_z=E_{z0}\exp\left[\mathrm{j}\omega\left(t-\frac{n}{c}x\right)\right]. \quad (1.22)$$

Как следует из (1.22), в идеальных диэлектриках ($\gamma \to 0$) амплитуда распространяющейся волны не изменяется. В проводящей среде γ имеет ненулевое значение. Аналогичные рассуждения, при которых получены выражения (1.19) и (1.20), но при ненулевом удельном электрическом сопротивлении приводят к уравнениям

$$\mu_a \varepsilon_a \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} + \gamma \mu_a \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2},$$
$$\mu_a \varepsilon_a \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} + \gamma \mu_a \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2}. \qquad (1.23)$$

Решение (1.23) относительно E_z имеет вид монохроматической волны

$$\dot{E}_z = E_{z0} \exp\left\{ j\omega \left[t - (n - j\varkappa) \frac{x}{c} \right] \right\}, \qquad (1.24)$$

где в отличие от (1.22) фигурирует не действительный, а комплексный показатель преломления $n_k = n - j\varkappa$, $\varkappa$ — показатель поглощения среды. Выражение (1.24) можно представить и в ином виде

$$\dot{E}_z = E_{z0} \exp\left[j\omega \left(t - \frac{n}{c} x \right) \right] \exp\left(-\frac{\omega}{c} \varkappa x \right). \qquad (1.25)$$

Из (1.25) видно, что амплитуда волны, распространяющейся в проводящей среде, уменьшается с расстоянием по экспоненциальному закону. Неизвестные величины n и $\varkappa$ в (1.25) определяют путем подстановки в дифференциальное уравнение (1.23) из выражения для $\dot{E}_z$ (1.24). После несложных преобразований получаем

$$n^2 = \frac{\mu_a \varepsilon_a c^2}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma \lambda}{2\pi c \varepsilon_a} \right)^2} \right], \qquad (1.26)$$

$$\varkappa^2 = \frac{\mu_a \varepsilon_a c^2}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma \lambda}{2\pi c \varepsilon_a} \right)^2} \right]. \qquad (1.27)$$

При $\gamma \to 0$ из (1.25), (1.26) следует: $n = c\sqrt{\mu_a \varepsilon_a}$, $\varkappa = 0$ (случай диэлектрических сред).

Поведение волны на границе раздела сред поясняет рис. 1.7, где показаны случаи, когда падающая волна (индекс i) линейно поляризована в плоскости $x0z$ и в плоскости $y0z$. Граничное условие для электромагнитного поля в плоскости $x0y$ состоит в том, что результирующая напряженность поля в первой среде, определяемая суммой векторов напряженности падающей $\mathbf{E}_{xi}$ и отраженной $\mathbf{E}_{xr}$ волн, равна напряженности про-

ходящей волны $\mathbf{E}_{xd}$. С учетом обозначений, приведенных на рис. 1.7, *а*, имеем

$$\mathbf{E}_{xi}=\mathbf{E}_{i\parallel}\cos\beta,\qquad \mathbf{E}_{xr}=\mathbf{E}_{r\parallel}\cos\beta_{rd}\qquad \mathbf{E}_{xd}=\mathbf{E}_{d\parallel}\cos\beta_{d},$$

где вектор $\mathbf{E}_{i\parallel}$ эквивалентен $\mathbf{E}_z$ в (1.22) или (1.24). Тогда граничное условие

$$[\mathbf{E}_{i\parallel}\cos\beta+\mathbf{E}_{r\parallel}\cos\beta_r=\mathbf{E}_{d\parallel}\cos\beta_d]_{z=0}\tag{1.28}$$

выполняется [см. (1.24)] только в случае, когда

$$n_{k1}\sin\beta=n_{k1}\sin\beta_r=n_{k2}\sin\beta_d.\tag{1.29}$$

Из (1.29) следует справедливость соотношений

$$\beta=\beta_r,\ \ \frac{\sin\beta_d}{\sin\beta}=\frac{n_1-j\varkappa_1}{n_2-j\varkappa_2},\tag{1.30}$$

известных как *закон отражения и закон преломления* электромагнитных волн.

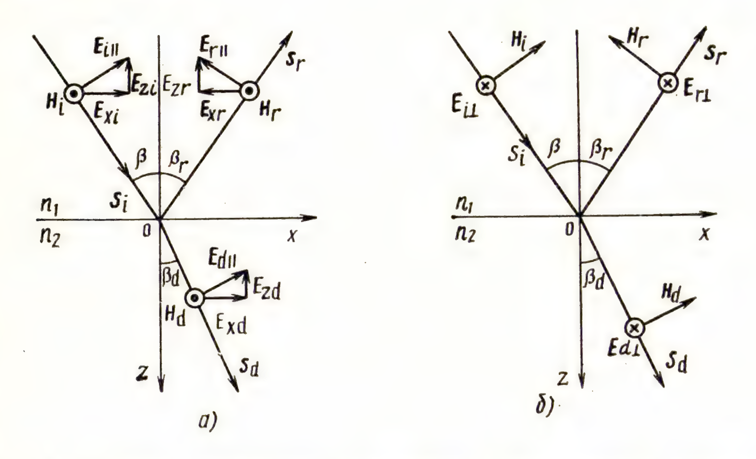


Рис. 1.7. Векторы напряженности падающей, отраженной и преломленной волн для случая параллельного (*а*) и перпендикулярного (*б*) плоскости падения вектора $\mathbf{E}_i$

Выражение (1.28) можно использовать для отыскания связи между напряженностью отраженной и падающей волн. Из условия непрерывности на границе $(H_i+H_r=H_d)_{z=0}$, с учетом связи между векторами напряженностями электрического и магнитного полей $|\mathbf{H}|=\frac{n_k}{\mu_a c}|\mathbf{E}|$ при $\mu_a\approx\mu_0$ получаем

$$[n_{k1}E_{i\parallel}+n_{k2}E_{r\parallel}=n_{k2}E_{d\parallel}]_{z=0}.\tag{1.31}$$

Уравнения (1.28) и (1.31) позволяют исключить $E_{d=}$ и представить результат в виде

$$\frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}}=\frac{\cos\beta/\cos\beta_d-n_{k1}/n_{k2}}{\cos\beta/\cos\beta_d+n_{k1}/n_{k2}}. \qquad (1.32)$$

Аналогично найдем выражение для волны, поляризованной в плоскости $y0z$:

$$\frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}}=-\frac{\cos\beta_d/\cos\beta-n_{k1}/n_{k2}}{\cos\beta_d/\cos\beta+n_{k1}/n_{k2}}. \qquad (1.33)$$

Для идеальных диэлектриков или прозрачных сред $\varkappa_1=\varkappa_2=0$, и уравнение (1.30) принимает вид *закона Снеллиуса*:

$$\frac{\sin\beta_d}{\sin\beta}=\frac{n_1}{n_2}. \qquad (1.34)$$

Используя (1.34), выражения (1.32), (1.33) можно привести к виду

$$\frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}}=\frac{\operatorname{tg}(\beta-\beta_d)}{\operatorname{tg}(\beta+\beta_d)},\quad \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}}=-\frac{\sin(\beta-\beta_d)}{\sin(\beta+\beta_d)}. \qquad (1.35)$$

Что касается связи преломленной и падающей волн, она устанавливается аналогично и в окончательном виде описывается уравнениями:

$$\frac{E_{d\parallel}}{E_{i\parallel}}=\frac{2\sin\beta_d\cos\beta}{\sin(\beta+\beta_d)\cos(\beta-\beta_d)},\qquad \frac{E_{d\perp}}{E_{i\perp}}=\frac{2\sin\beta_d\cos\beta}{\sin(\beta+\beta_d)}. \qquad (1.36)$$

Соотношения (1.35), (1.36) между амплитудами падающей, отраженной и преломленной волн известны под названием *формул Френеля*. Результаты вычисления $E_{j=}$ и $E_{j\perp}$ ($j=i, r, d$) позволяют решить задачу об отражении и преломлении электромагнитной волны произвольной поляризации.

Как указывалось, плотность потока энергии, переносимой в единицу времени через единичную площадку $|\mathbf{S}|=E_zH_y$, характеризует модуль вектора Умова — Пойнтинга [см. рис. 1.1 и выражение (1.1)]. Усредняя энергию за период колебаний $2\pi/\omega$, получаем

$$J_i=\frac{cn_1}{8\pi}\left(E^2_{i\perp}+E^2_{i\parallel}\right)\cos\beta,\qquad J_r=\frac{cn_1}{8\pi}\left(E^2_{r\perp}+E^2_{r\parallel}\right)\cos\beta,$$

$$J_d=\frac{cn_2}{8\pi}\left[E^2_{d\perp}+E^2_{d\parallel}\right]\cos\beta_d. \qquad (1.37)$$

Для поляризованного излучения усредненные по времени величины $\bar{E}^2_{i\parallel}=\bar{E}^2_{i\perp}$. Тогда с учетом (1.35) и (1.37) уравнения для *коэффициентов отражения* запишем в виде

$$\rho_\perp=\left[\frac{\sin(\beta-\beta_d)}{\sin(\beta+\beta_d)}\right]^2,\qquad \rho_\parallel=\left[\frac{\operatorname{tg}(\beta-\beta_d)}{\operatorname{tg}(\beta+\beta_d)}\right]^2,\qquad \rho=\frac{\rho_\perp+\rho_\parallel}{2}. \qquad (1.38)$$

В случае нормального падения ($\beta=\beta_r=0$)

$$\rho_\perp=\rho_\parallel=\left(\frac{n_2-n_1}{n_2+n_1}\right)^2. \tag{1.39}$$

В случае поглощающих сред ($\varkappa\neq 0$) теоретические формулы аналогичны полученным, но вместо действительного показателя преломления n в них фигурирует комплексный показатель преломления:

$$\frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}}=\frac{\cos\beta/\cos\beta_d-[(n_1-j\varkappa_1)/(n_2-j\varkappa_2)]}{\cos\beta/\cos\beta_d+[(n_1-j\varkappa_1)/(n_2-j\varkappa_2)]}. \tag{1.40}$$

Таблица 1.3

Фазовые соотношения между составляющими электромагнитной волны

Условия на границе раздела сред	$\beta+\beta_d<0{,}5\pi$	$\beta+\beta_d>0{,}5\pi$
$\beta>\beta_d$ ($n_2>n_1$)	$E_{r\perp}$ и $E_{i\perp}$, а также $E_{r\parallel}$ и $E_{i\parallel}$ противоположны по фазе (знаку)	$E_{r\perp}$ и $E_{i\perp}$ противоположны по фазе. $E_{r\parallel}$ и $E_{i\parallel}$ совпадают по фазе
$\beta<\beta_d$ ($n_2<n_1$)	$E_{r\perp}$ и $E_{i\perp}$, а также $E_{r\parallel}$ и $E_{i\parallel}$ совпадают по фазе	$E_{r\perp}$ и $E_{i\perp}$ совпадают по фазе. $E_{r\parallel}$ и $E_{i\parallel}$ противоположны по фазе

Отражательную способность границы раздела сред можно найти, умножая (1.40) на сопряженную комплексную функцию. В результате получим

$$\rho_\parallel=\frac{(n_2\cos\beta-n_1\cos\beta_d)^2+(\varkappa_2\cos\beta-\varkappa_1\cos\beta_d)^2}{(n_2\cos\beta+n_1\cos\beta_d)^2+(\varkappa_2\cos\beta+\varkappa_1\cos\beta_d)^2},$$

$$\rho_\perp=\frac{(n_2\cos\beta_d-n_1\cos\beta)^2+(\varkappa_2\cos\beta_d-\varkappa_1\cos\beta)^2}{(n_2\cos\beta_d+n_1\cos\beta)^2+(\varkappa_2\cos\beta_d+\varkappa_1\cos\beta)^2}.$$

Из формул (1.36) следует, что знаки $E_{d\parallel}$ и $E_{i\parallel}$, а также знаки $E_{d\perp}$ и $E_{i\perp}$ совпадают при любых значениях углов β и β_d. Для компонентов отраженной волны [см. (1.38)] в зависимости от суммы углов $\beta+\beta_d$ и значения показателей преломления n_1, n_2 имеют место различные случаи (табл. 1.3).

При $\beta+\beta_d=\pi/2$ $\rho_\parallel\to 0$. Это условие выполняется, когда угол падения равен так называемому *углу Брюстера* $\beta=\mathrm{arctg}\,(n_2:n_1)=\beta_Б$.

При $\beta=\beta_Б$ отраженное излучение оказывается линейно поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. На рис. 1.8 показаны зависимости $\rho_\perp$ и $\rho_\parallel$ от угла падения β. Для сравнения на том же рисунке приводится аналогичная зависимость для неполяризованного излучения (штриховая ли-

ния). Видно, что при отражении излучение частично поляризуется.

До сих пор предполагалось, что излучение распространяется из менее плотной среды в более плотную (например, из воздуха в стекло). В соответствии с законом преломления (1.30) $\sin\beta_d=(n_1/n_2)\sin\beta$. Если $(n_1/n_2)<1$ (излучение падает из менее плотной среды), то при изменении угла падения β от 0 до 90° угол преломления β_d всегда меньше $\pi/2$, и излучение входит во вторую среду. Однако на противоположной границе ОК

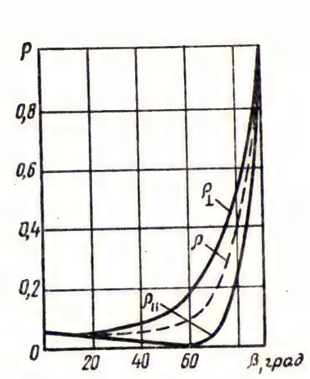


Рис. 1.8. Коэффициент отражения в функции угла падения

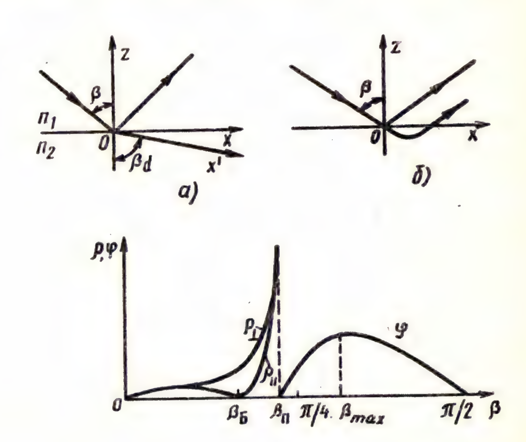


Рис. 1.9. К пояснению появления полного внутреннего отражения:

а — общая картина на границе раздела сред; *б* — $\beta>\beta_п$; *в* — зависимость коэффициента отражения и разности фаз $\varphi_\parallel-\varphi_\perp$ от угла падения ($n_1>n_2$)

(при выходе прошедшего излучения из более плотной среды в менее плотную) справедливо иное условие: $n_1/n_2=1/n>1$. При некотором значении угла $\beta_п$, называемом критическим или предельным и меньшем $\pi/2$, угол преломления β_d становится равным $\pi/2$ и излучение обратно отражается в первую среду. *Эффект полного внутреннего отражения* иллюстрируется элементарными опытами. Для системы «стекло — воздух» $n_1/n_2=1{,}5/1$, и при $\beta>42°$ излучение не выходит из стекла. Аналогичная картина наблюдается в диапазоне радиоволн СВЧ при выходе излучения из парафина в воздух.

Поведение волны, как нам уже известно, подчиняется закономерностям, графически отраженным рис. 1.9, *а*. Преломленная волна, распространяющаяся в направлении x', в общем виде может быть записана в виде

$$\dot{E}_2 = E_{20}\exp\left[j\omega\left(\frac{t-x'}{v_2}\right)\right] = E_{20}\exp\left[j\omega\left(t - \frac{x\sin\beta_d + z\cos\beta_d}{v_2}\right)\right] =$$

$$= E_{20}\exp\left[-\frac{j\omega z\cos\beta_d}{v_2}\right]\exp\left[j\omega\left(t - \frac{x}{v_2/\sin\beta_d}\right)\right] =$$

$$= E_A\exp\left[j\omega\left(t - \frac{x}{v_2/\sin\beta_d}\right)\right].$$

Амплитуда E_A этой волны уменьшается с ростом z и характеризует глубину проникновения излучения во вторую среду. Представляя

$$\cos\beta_d = -j\sqrt{(n^{-2}\sin^2\beta) - 1}, \tag{1.41}$$

получаем

$$E_A = E_{20}\exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda}z\sqrt{\frac{\sin^2\beta}{n^2} - 1}\right). \tag{1.42}$$

Из (1.42) следует, что $E_A \to 0$ при $z > \lambda$, т. е. часть излучения проходит во вторую среду, а затем возвращается в первую, как показано на рис. 1.9, *б*.

Основываясь на формулах Френеля (1.35), с учетом выражения (1.41) можно показать, что $|E_{r\parallel}/E_{i\parallel}| = |E_{r\perp}/E_{i\perp}| = 1$ при $\beta \geqslant \beta_и$ и, следовательно, все излучение возвратится в первую среду. Поведение коэффициентов отражения при $n_2 < n_1$ не отличается от рассмотренного ранее случая $n_2 > n_1$ (сравните графики на рис. 1.8 и 1.9, *в*). Фаза составляющих $E_{r\perp}$ и $E_{r\parallel}$ изменяется относительно $E_{i\perp}$ и $E_{i\parallel}$. Соответственно разность фаз $\varphi = \varphi_\parallel - \varphi_\perp$ зависит от угла падения волны

$$\mathrm{tg}\frac{\varphi}{2} = \frac{\cos\beta\sqrt{\sin^2\beta - n^2}}{\sin^2\beta}, \tag{1.43}$$

обращается в нуль дважды — при $\beta = \beta_п (\sin\beta_п = n)$ и при $\beta = \pi/2$ (скользящее падение) и переходит через максимум при условии $\mathrm{tg}(\varphi_{max}/2) = (1 - n^2)/2n^2$ (рис. 1.9, *в*).

Таким образом, если в падающей волне составляющие $E_{i\parallel}$ и $E_{i\perp}$ синфазны, то в отраженной между $E_{r\parallel}$ и $E_{r\perp}$ появляется фазовый сдвиг, зависящий от значений β и n. Излучение становится эллиптически поляризованным.

На использовании явления полного внутреннего отражения построены приборы для быстрого определения показателя преломления (диэлектрической проницаемости) с погрешностью, не превышающей 0,1 %.

Из изложенного следует возможность определения по электрическим и магнитным свойствам ОК составляющих комплексного показателя преломления n и $\varkappa$ [см. (1.26), (1.27)]. Для металлов значение γ велико. При больших длинах волн ($\lambda >$

>5 мкм) в выражениях (1.26) и (1.27) $\gamma\lambda/2\pi c\varepsilon_a \gg 1$ и они преобразуются к виду

$$n \cong \varkappa = \sqrt{\lambda\gamma\mu_a c/(4\pi)} \,. \qquad (1.44)$$

В этой формуле все величины представлены в единицах СИ. Если λ измерять к мкм, γ — в $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$ (вместо $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$), формула (1.44) принимает вид $n = \varkappa = \sqrt{0{,}003\lambda\gamma}$ $(\mu = \mu_0)$ и известна как *формула Хагена — Рубенса.*

Приведенные соотношения справедливы для поверхностей, высота l неровностей которых существенно меньше длины волны излучения. Такие поверхности называют *гладкими,* они характеризуются условием $\sigma_l/\lambda < 1$, где σ_l — среднее квадратическое значение высоты неровностей (шерохозуются условием $\sigma_l/\lambda < 1$, возникают отражения во впадинах между неровностями, увеличивается поглощение падающего излучения.

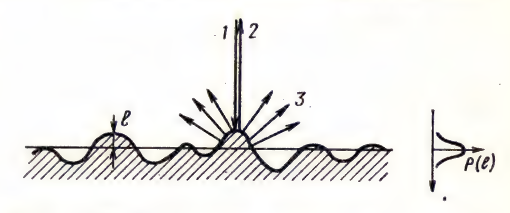


Рис. 1.10. Отражение излучения от неровностей поверхности:

1 — падающее излучение; *2* — зеркально отраженное излучение; *3* — диффузно отраженное излучение

Интуитивно понимание шероховатости поверхности связано с наличием совокупности неровностей на ней (рис. 1.10). Несмотря на относительно малые размеры неровностей, они оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства ОК.

Для металлов, характеризующихся гауссовым распределением $p(l)$ высоты неровностей, справедлива формула

$$\rho_s(\beta)/\rho(\beta) = \exp\left[-\left(4\pi \frac{\sigma_l}{\lambda} \cos\beta\right)^2\right], \qquad (1.45)$$

где $\rho_s(\beta)$ — зеркальная отражательная способность шероховатой поверхности; $\rho(\beta)$ — отражательная способность идеальной поверхности для того же материала; σ_l — среднее квадратическое значение высоты неровностей; β — угол падения (отражения); l — высота неровностей поверхности относительно среднего значения. Для диффузного отражения направленно-полусферическая отражательная способность поверхности при заданном угле падения β находится из выражения для интегрального отражения в полусферу

$$\frac{\rho_d(\beta)}{\rho(\beta)} = \frac{\pi^3}{\cos\beta} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\beta_r=0}^{\pi/2} \left(\frac{a_l}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{\sigma_l}{\lambda}\right)^2 (\cos\beta_r + \cos\beta)^4 (\sin\beta_r) \exp\left\{-\left(\frac{\pi a_l}{\lambda}\right)^2 [\sin\beta_r (\cos\varphi - \sin\beta)^2 + \sin^2\beta_r \cdot \sin^2\varphi]\right\} d\beta_r d\varphi \text{ при } \sigma_l/\lambda \ll 1, \qquad (1.46)$$

$$\frac{\rho_d(\beta)}{\rho(\beta)} = \frac{1}{32\pi^2 \cos\beta}\left(\frac{a_l}{\sigma_l}\right)^2 \int\limits_{\varphi=0}^{2\pi}\int\limits_{\beta_r=0}^{\pi/2} (\cos\beta_r + \cos\beta)^2 (\sin\beta_r) \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a_l}{\sigma_l}\right)^2 \left[\frac{(\sin\beta_r \cos\varphi - \sin\beta)^2 + \sin^2\beta_r \sin^2\varphi}{(\cos\beta_r + \cos\beta)^2}\right]\right\} \times$$

$$\times d\beta_r d\varphi \text{ при } \sigma_l/\lambda > 1. \qquad (1.47)$$

В формулах (1.46) и (1.47) введена характерная длина a_l, которая связана со средним квадратическим отклонением σ_l и средним квадратическим наклоном поверхности σ_β соотношением $a_l = \sqrt{2}\sigma_l/\sigma_\beta$.

Справедливость формул (1.45) ... (1.47), выведенных теоретически, проверялась экспериментально. Совпадение расчетных результатов, проведенных по формуле (1.45), с результатами, полученными в опытах, оказалось достаточно хорошим в диапазоне $\sigma_l/\lambda = 0{,}03 \ldots 0{,}2$. Что касается выражений (1.46), (1.47), то их рекомендуется использовать для углов падения до 20°. Расчетные значения коэффициентов отражения (1.45) в диапазоне $0 < \sigma_l/\lambda < 0{,}05$ оказались близкими к экспериментальным результатам, полученным для диэлектриков.

Таким образом, падающее на границу двух сред излучение частично отражается, частично проходит в другую среду. Составляющая отраженного излучения зависит от значений показателей преломления обеих сред, и при знании одного из них можно найти другой, как и при использовании явления полного внутреннего отражения, а также с привлечением расчетного метода (при известных ограничениях) по формуле (1.44).

Для шероховатых поверхностей $\sigma_l/\lambda > 1$, и отраженное излучение наряду с зеркальной составляющей содержит и диффузионную. Соответствующие коэффициенты, пронормированные относительно отражательной способности идеальной поверхности для того же материала, функционально связаны со средним квадратическим значением высоты неровностей и могут быть использованы для контроля качества поверхностей.

Феноменологический подход для описания взаимодействия излучения с ОК на границе раздела сред справедлив, когда длина волны излучения существенно превышает межатомные расстояния. Это условие соблюдается для СВЧ и оптических излучений. Для более коротковолновых излучений следует учитывать ряд новых эффектов взаимодействия, о которых речь пойдет в § 1.6.

Задачи

1.3.1. Определить, насколько уменьшится амплитуда монохроматической электромагнитной волны ($\lambda = 9$ мкм) при ее распространении на пути длиной 1 мкм в алюминии по сравнению с идеальным диэлектриком, показатель пре-

ломления которого равен действительной части показателя преломления алюминия.

Решение

Изменение амплитуды волны при распространении в проводящей среде описывается выражением (1.24), а при распространении в диэлектрике — выражением (1.22). Отношение этих величин $E_z(\gamma)/E_z(\gamma\to 0)=\exp\left(-\frac{\omega\varkappa}{c}x\right)$ представляет решение поставленной задачи в общем виде.

Используя равенство $\omega=2\pi v/\lambda=2\pi c/\lambda$, формулу Хагена — Рубенса и принимая для алюминия $\gamma=0{,}0357\times10^{+8}$ Ом$^{-1}\cdot$м$^{-1}$, получим при $x=1$ мкм $E_z(\gamma)/E_z(\gamma\to 0)=0{,}0018$, т. е. амплитуда волны уменьшится более чем в 500 раз.

1.3.2. Неполяризованное излучение падает под углом 30°, отсчитываемым от нормали к поверхности диэлектрика (среда 2) из воздуха (среда 1). Параметры диэлектрика: $\varkappa=0$; $n_2=3{,}0$. Найти направленно-полусферическое отражение поверхности для поляризованных составляющих излучения и для неполяризованного излучения.

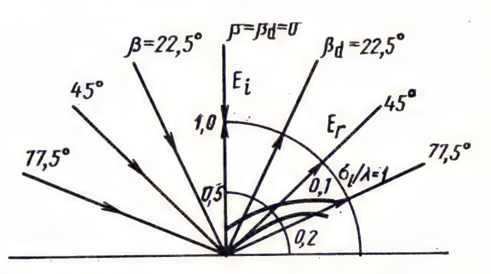


Рис. 1.11. Зависимость зеркальной составляющей отраженного излучения поверхности от угла падения β и показателя шероховатости σ_l/λ

Решение

Поскольку луч падает из воздуха, $n_{k1}=n_1-j\varkappa_1\approx 0$. Из (1.30) следует $n_1/n_2=1/3=(\sin\beta_d)/\sin 30°$, откуда $\beta_d=9{,}6°$ [см. (1.38)]; $\rho_\perp=0{,}301$; $\rho_\parallel=0{,}202$; $\rho=0{,}252$.

1.3.3. Определить характер изменения зеркально отраженной составляющей от шероховатой поверхности с ростом угла падения излучения.

Решение

Воспользуемся формулой (1.45) и построим графики зеркальной составляющей отраженного излучения для разных значений углов β и параметра шероховатости σ_l/λ (рис. 1.11).

Можно сделать однозначный вывод, что с ростом угла падения зеркальная составляющая увеличивается, приращение ее тем заметнее, чем больше отношение σ_l/λ.

§ 1.4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Выражение (1.25) описывает распространение в однородной среде излучения, интенсивность которого падает с расстоянием по закону

$$|E_z|^2=E_{z0}^2\exp\left(-\frac{2\omega\varkappa}{c}x\right)=E_{z0}^2\exp(-\alpha_{\lambda п}x). \quad (1.48)$$

Общая закономерность $|E_z|^2=E^2_{z0}\exp(-\alpha_п x)$ установлена Бугером и ее физический смысл состоит в том, что показатель поглощения вещества $\alpha_п$ не зависит от плотности потока энергии излучения. Однако следует иметь в виду, что при достаточно большом значении E^2_{z0} наблюдаются отступления от указанной закономерности, например при распространении мощных пучков лазерного излучения в полупрозрачных средах.

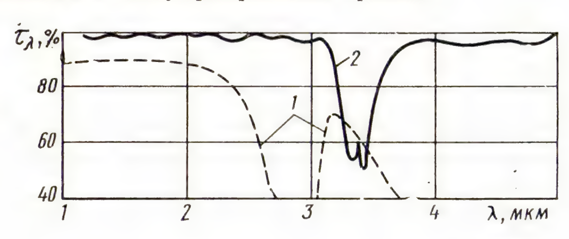


Рис. 1.12. Спектральное пропускание τ_λ кристаллического кварца толщиной 10 мм (*1*) и полиметилметакрилата (плексиглас) толщиной 0,02 мм (*2*)

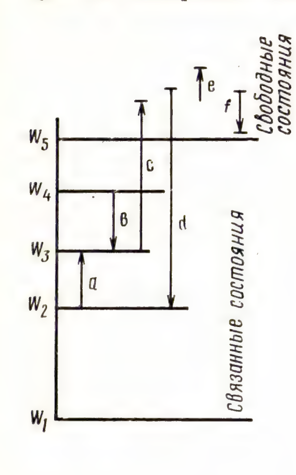


Рис. 1.13. Диаграмма энергетических состояний и переходов для атома, иона, электрона:

a — связанно-связанное поглощение; *b* — связанно-связанное излучение; *c* — связанно-свободное поглощение; *d* — свободно-связанное излучение; *e*, *f* — свободно-свободное поглощение (излучение)

Зависимость, аналогичная (1.48), справедлива и для растворов, когда показатель поглощения пропорционален числу поглощающих молекул на единицу пути:

$$|E_z|^2=E^2_{z0}\exp(-A_Б c_р x),$$

где $A_Б$ — коэффициент, не зависящий от концентрации и характерный для молекулы поглощающего вещества; $c_р$ — концентрация вещества в растворе.

Можно указать на ряд причин, приводящих к рассеянию энергии излучения, распространяющегося в ОК в данном направлении (см. § 1.6). Одна из них в том, что в результате взаимодействия фотона с микрочастицей вещества происходит изменение его траектории. Захват частицей фотона может привести к испусканию кванта энергии в произвольном направлении. Переход колебательной энергии в энергию поступательного движения столкнувшихся атомов, т. е. в теплоту, также вносит заметный вклад в ослабление распространяющегося излучения. Показатель поглощения сильно зависит от длины волны. В качестве примера на рис. 1.12 приведены спектральные кривые пропускания электромагнитного излучения кварцем и плексигласом. Наблюдается заметное поглощение излучения на отдельных участках спектра.

Отмеченное явление имеет следующее объяснение.

На рис. 1.13 схематически представлена диаграмма энергетических состояний атома, иона, электрона. Нижний уровень $W_1=0$ соответствует основному состоянию, уровень W_5 — энергии, необходимой для ионизации атома. При захвате микрочастицей (поглощение) фотона ее энергия увеличивается (стрелки направлены вверх), при испускании фотона энергия уменьшается (стрелки вниз).

Различают три вида возможных переходов: связанно-связанные, связанно-свободные, свободно-свободные. Первый характеризуется тем, что атом или молекула поглощает или испускает фотон, но не происходит ни ионизации, ни рекомбинации ионов и электронов (*а, в* на рис. 1.13). Этот тип переходов определяется вращательными, колебательными и электронными состояниями молекул, а также электронными состояниями в атомах.

Вращательным переходам соответствуют длины волн примерно от 8 до 1000 мкм и более, колебательно-вращательным — от 1,5 до 20 мкм, электронным — от 0,4 до 0,7 мкм, а также часть ультрафиолетовой и ближней инфракрасной области. Поскольку связанно-связанные переходы характеризуются дискретными энергетическими уровнями, поглощенное телом (или испускаемое им) излучение наблюдается на строго определенных частотах ν. Фотоны с иными энергиями в интервале $0<\nu<(W_5/h)$ не могут быть поглощены (испущены).

При поглощении атомом фотона, энергия которого достаточна, чтобы вызвать ионизацию, образуется ион и свободный электрон (*с* на рис. 1.13). Этот процесс называется связанно-свободным поглощением (фотоионизацией), а обратный ему процесс *d* — свободно-связанным излучением (фоторекомбинацией). Как в первом, так и во втором случае образующиеся и рекомбинирующие частицы могут иметь любую кинетическую энергию, и следовательно, соответствующий им спектр поглощения (излучения) непрерывен.

В ионизированном газе при поглощении фотона электроном его кинетическая энергия увеличивается (процесс *е* на рис. 1.13), а при испускании фотона — уменьшается (процесс *f* на рис. 1.13). Из-за неопределенности энергии исходного (конечного) состояния электрона следует, что спектры рассматриваемых процессов, обусловленных свободно-свободными переходами, непрерывны.

Таким образом, полная энергия молекулы $W_м=W_э+W_к+W_в$ представляет набор электронных уровней энергии $W_э$, отстоящих относительно далеко друг от друга по сравнению с колебательными $W_к$ и вращательными $W_в$ уровнями. Структура спектра излучения, определяемая числом и расположением энергетических уровней, различна для разных квантовых систем. Этот признак используется при контроле состава ОК, наличия в них примесей.

Более сложные процессы, хотя и подобные рассмотренным, происходят в твердых телах и в жидкостях. Из-за сближения частиц энергетические уровни молекулы расщепляются, образуя непрерывные полосы. В жидкостях и кристаллах затруднительно выделить отдельные молекулы, у многих органических соединений внутримолекулярные силы значительно больше межмолекулярного притяжения. Поэтому кривая поглощения (испускания) твердых тел и жидкостей может иметь сложную форму.

Особенности взаимодействия излучения с ОК с учетом зависимости коэффициента поглощения от длины волны можно рассмотреть в рамках электронной теории Лоренца, когда используется простейшая модель атома, в которой принято считать, что электрон удерживается в положении равновесия квазиупругой силой, а вещество рассматривается как совокупность заряженных частиц, размещенных в вакууме на расстояниях, больших по сравнению с размерами самих частиц. Такая модель от-

личается от принятой в настоящее время, основанной на представлениях квантовой механики. Однако результаты, получаемые в рамках электронной и квантовой теорий, совпадают в области низких частот, включая и ультрафиолетовые волны. Это объясняется тем, что электрические и магнитные поля остаются почти постоянными на расстояниях порядка $\lambda/2\pi$. Для видимого света $\lambda/2\pi \approx 10^{-7}$ м, а в объеме $(10^{-7})^3$ м^3 содержится около 10^8 атомов конденсированного вещества и около $3 \cdot 10^4$ молекул любого газа при нормальных условиях. Поэтому для волн, включая и ультрафиолетовые, вещество проявляет себя как сплошная однородная среда, характеризуемая средними значениями физических величин, таких, как плотность заряда, напряженность поля. Для рентгеновских лучей, когда длина волны становится соизмеримой с межатомными расстояниями, макроскопический подход становится неприемлемым.

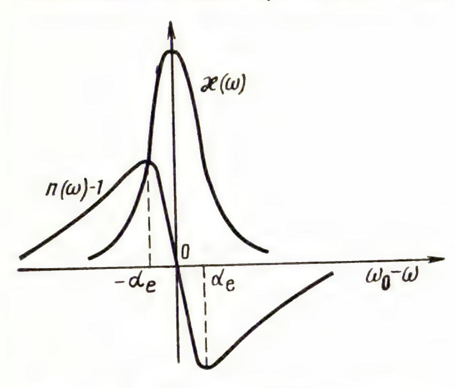


Рис. 1.14. Дисперсионная кривая и контур поглощения

В рамках электронной теории Лоренца получено выражение

$$(n^2-1)/(n^2+2)=u_{\text{р}}^2/[3(\omega_0^2-\omega^2)], \qquad (1.49)$$

где $u_{\text{р}}=(Ne^2/m_e\varepsilon_0)^{0,5}$ — константа, характеризующая модель среды; ε_0 — диэлектрическая постоянная; N — концентрация атомов вещества; ω_0 — собственная частота колебаний заряда; e — заряд электрона.

На основании уравнения (1.49) и соотношения $n_{\text{к}}=n-j\varkappa$ несложно получить приближенные выражения (вывод приведен в [2]) для составляющих коэффициента преломления:

$$n(\omega)\approx 1+\frac{u_{\text{р}}^2}{4\omega_0}\,\frac{\omega_0-\omega}{(\omega_0-\omega)^2+\alpha_e}, \quad \varkappa(\omega)\approx\frac{u_{\text{р}}^2}{4\omega_0}\,\frac{\alpha_e}{(\omega_0-\omega)^2+\alpha_e}.$$

Постоянная затухания α_e характеризует силу, противодействующую колебаниям заряда. Затухание обусловлено собственным излучением колеблющегося заряда, диссипацией энергии электромагнитного поля, т. е. превращением ее в другие формы (теплоту).

Графики функций $n(\omega)-1$ и $\varkappa(\omega)$ приведены на рис. 1.14. Зависимость показателя поглощения $\varkappa(\omega)$ от частоты характеризует *спектральный контур линии поглощения.* Функция $n(\omega)$ называется *дисперсионной кривой.* Явление уменьшения показа-

теля преломления с частотой в пределах ширины спектрального контура линии поглощения получило название *аномальной дисперсии.*

С приближением частоты падающей волны к собственной частоте колебаний заряда ω_0 основной эффект взаимодействия излучения с веществом связан с поглощением излучения (максимум $\varkappa$). Спектральная плотность солнечного излучения на земной поверхности имеет минимумы на частотах, равных собственным частотам колебаний входящих в состав атмосферы атомов. Зная местоположения этих минимумов на шкале длин волн, можно судить о химическом составе атмосферы. На этом принципе разработаны приборы для контроля вредных выбросов в атмосферу.

Кривая $n(\omega)$ имеет максимум на частоте $\omega=\omega_0-\alpha_e$ и минимум на частоте $\omega=\omega_0+\alpha_e$. Резкое изменение показателя преломления в области собственных частот колебаний зарядов позволяет также проконтролировать состав вещества. На этом принципе построен ряд приборов для исследовательских целей.

Формула (1.49) справедлива для описания поведения показателя преломления вблизи одной линии поглощения. Для широкой области спектра

$$n^2(\omega)=1+u_p\sum_{\text{к}} f_{\text{к}}/(\omega_{0\text{к}}^2-\omega^2-2j\omega\alpha_{ek}),$$

где $f_{\text{к}}$ — так называемые силы осцилляторов, удовлетворяющие условию $\sum\limits_{\text{к}} f_{\text{к}}=1$. Аналогичная формула получена в квантовой электродинамике. Вместо собственных частот колебаний зарядов в ней фигурируют частоты $\omega_{i\text{к}}=(W_{\text{к}}-W_i)/\hbar$, определяемые *формулой Планка*:

$$n^2(\omega)=1+\frac{e^2}{m_e\varepsilon_0}\sum_{i,\text{к}}\frac{N_i f_{i\text{к}}}{\omega_{i\text{к}}^2-\omega^2-2j\omega\alpha_{e\text{к}}}.$$

Величина $f_{i\text{к}}$ связана с вероятностью перехода системы из i-го состояния в к-е; N_i — концентрация атомов, находящихся в состоянии с энергией W_i; $\sum N_i=N$ — полная концентрация атомов в веществе.

Если для пары уровней допустить возможность выполнения неравенств $W_i>W_{\text{к}}$ и $N_i>N_{\text{к}}$, величина $f_{i\text{к}}$ становится отрицательной. Отсюда следует, что дисперсия в окрестности частоты $\omega\approx\omega_{i\text{к}}$ будет также отрицательной, что соответствует условию усиления волн при прохождении их через вещество. Эта неожиданная, на первый взгляд, возможность используется на практике при создании квантовых генераторов (см. § 3.2).

В металлах часть электронов не связана с каким-либо атомом, и в отличие от рассмотренного случая для диэлектриков «квазиупругая» сила равна нулю ($\omega_0=0$). С учетом этого условия классическая формула дисперсии принимает вид [2]

$$\varepsilon_a(\omega)=n^2(\omega)=1-u_p^2/[\omega(\omega+2j\alpha_e)],$$

причем постоянная затухания в данном случае выражается через удельную проводимость металла: $\alpha_e = Ne^2/2m_e\gamma$. Как следует из последней формулы, на низких частотах ($\omega \ll \alpha_e$, т. е. при $\lambda > 1$ мм) показатель преломления — величина комплексная, и волны проникают в глубь металла на расстояние, меньшее длины волны в вакууме (скин-эффект). Они почти полностью отражаются от поверхности, поскольку коэффициент отражения для них близок к единице. При $\omega \gg \alpha_e$ (высокие частоты) $2j\alpha_e \ll \omega$ выражение для $\varepsilon_a(\omega)$ становится вещественным: $\varepsilon_a(\omega) = n^2(\omega) = 1 - u_p^2/\omega^2$.

При $\omega < u_p$ и $\omega \gg \alpha_e$ диэлектрическая проницаемость — отрицательная величина (показатель преломления мнимый) и происходит полное отражение падающей волны от границы раздела сред. Если $\omega > u_p$ (справедливо для рентгеновских излучений), показатель преломления становится вещественным, а металл — прозрачным для излучения. Этот вывод объясняет причину прозрачности щелочных металлов в ультрафиолетовой области (для натрия u_p соответствует $\lambda_p \approx 0{,}21$ мкм), непрозрачных в видимой области излучений. Для промежуточных частот ($\omega \approx u_p$) вещественная и мнимая части показателя преломления отличны от нуля и электромагнитные волны при распространении в металле затухают по-разному. Так, пленка золота пропускает видимый свет, но поглощает волны инфракрасного диапазона.

Приведенные результаты объясняют характер распространения радиоволн в ионосфере Земли. Величина u_p, имеющая размерность частоты, попадает в диапазон радиоволн. Поэтому излучения с длиной волны более 10 м отражаются ионосферой, а более короткие проходят через нее. Отсюда ясно, почему длинные волны используются для дальней радиосвязи, а короткие — для радиолокации планет.

Следует обратить внимание на одно обстоятельство. При $\omega \gg u_p$ показатель преломления примерно равен единице. Для рентгеновских лучей с длиной волны 0,1 нм в стекле он равен $(1 \ldots 5 \cdot 10^{-6})$. Поэтому многочисленные неровности граничных поверхностей, разделяющих отдельные области, не меняют условий прохождения рентгеновских лучей, но значительно рассеивают видимый свет, для которого $n > 1$.

Условие $n < 1$ указывает на возможность полного внутреннего отражения на границе раздела сред, что подтверждено экспериментами при различных сочетаниях материалов, в частности на границе воздух — стекло в диапазоне рентгеновского излучения.

С учетом колебания ионов вещества под действием электромагнитного излучения формула для дисперсии (1.49) преобразуется к виду (затухание примем равным нулю):

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{N_e e^2}{3m_e\varepsilon_0(\omega_0^2-\omega^2)} + \frac{N_и e^2}{3M_и\varepsilon_0(\omega_и^2-\omega^2)}, \qquad (1.50)$$

где $M_и$ — масса иона; $\omega_0(\omega_и)$ — собственная частота электрона (иона); $N_e(N_и)$ — концентрация электронов (ионов). Из условия $M_и \gg m_e$ следует, что $\omega_0 \gg \omega_и$. При $\omega \ll \omega_и$ выражение (1.50) упрощается:

$$n^2(\omega \to 0) = 1 + [C_0/(\omega_0^2 - \omega^2)] + [C_и/(\omega_и^2 - \omega^2)], \qquad (1.51)$$

где C_0 и $C_и$ — постоянные, связанные соотношением $C_0/C_и = m_e/M_и$. Согласно (1.51) при больших длинах волн, заметно превышающих период колебаний элементарных частиц вещества, показатель преломления не зависит от частоты, и становится справедливой формула Максвелла: $n = \sqrt{\varepsilon_a \mu_a}$.

Выражение для поворота плоскости поляризации волны на угол $\varphi_п$ при прохождении через вещество, помещенное во внешнее продольное магнитное поле:

$$\varphi_п = h_в H_{вн} d, \qquad (1.52)$$

где $h_в \simeq 1/\lambda^2$ — *константа Верде*, зависящая от типа оптических материалов и длины волны; $H_{вн}$ — напряженность внешнего поля; d — длина пути распространения излучения в исследуемом веществе.

При теоретическом рассмотрении действия волны на излучающий электрон в условиях $H_{вн} \neq 0$ оказалось, что показатели преломления для двух циркулярно поляризованных колебаний с противоположными направлениями вращения вектора напряженности **E** не одинаковы. Поэтому плоскость поляризации суммарной волны, получающейся в результате сложения двух циркулярно поляризованных волн после прохождения ими некоторого пути в веществе, должна повернуться относительно исходного положения. Не останавливаясь на доказательстве справедливости указанного положения, приведем окончательное выражение для константы Верде ($\alpha_e = 0$):

$$h_в = \frac{e}{2 m_e c} \, \omega \, \frac{dn}{d\omega}, \qquad (1.53)$$

где $n = 0{,}5(n_+ + n_-)$; n_+, n_- — коэффициенты преломления циркулярно поляризованных волн с противоположными направлениями вращения вектора напряженности **E**.

Формула (1.52) характеризует угол поворота плоскости поляризации в пара- и диамагнитных материалах. Для большинства твердых тел при напряженности магнитного поля около 1 МА/м и $d \simeq 0{,}1$ м значение $\varphi_п$ лежит в пределах 1 ... 2°.

Поскольку число атомов N в единице объема вещества характеризует его плотность, а показатель преломления — его физические свойства, зависимость (1.52) является основой для контроля диэлектрической проницаемости вещества.

Многие вещества, называемые активными, изменяют положение плоскости поляризации вектора напряженности **E** рас-

пространяющейся волны и в отсутствие внешнего магнитного поля. Эта особенность присуща в основном кристаллическим и аморфным веществам и описывается углом поворота, выражаемым для твердых тел в виде

$$\varphi_т=\varphi_0 d, \qquad (1.54)$$

а для растворов — в виде $\varphi_р=\varphi_0 c_р d$, где φ_0 — удельное вращение (постоянная вращения), характеризующее природу вещества; d — толщина образца; $c_р$ — концентрация активного вещества. Зависимость параметра φ_0 от температуры незначительна:

Таблица 1.4

Удельное вращение для различных ОК

Материал	Длина волны, мкм	φ_0, град/мм	Материал	Длина волны, мкм	φ_0, град/мм
Киноварь	0,5893	560	Кварц	0,2265	201,9
	0,6022	480		0,5086	29,728
	0,7188	190		0,8948	11,589
Сахар тростниковый	0,43	3,122	Камфара	0,4358	1,755
	0,54	1,907		0,5461	0,826
	0,626	1,503		0,5893	0,65

примерно 0,001% при изменении температуры на 1°С. Для кварца в диапазоне 0,23 ... 2,8 мкм постоянная вращения описывается *уравнением Друде* [3]

$$\varphi_0=\frac{C_{01}\lambda_1^2}{\lambda^2-\lambda_1^2}+\frac{C_{02}\lambda_2^2}{\lambda^2-\lambda_2^2}+C_{03},$$

где C_{01}, C_{02}, C_{03} — постоянные коэффициенты; λ_1, λ_2 — длины волн, соответствующие максимумам полос поглощения. Для области 1,8 ... 4 мкм

$$\varphi_0=7{,}25/\lambda^2-0{,}19. \qquad (1.55)$$

В табл. 1.4 приведены значения удельного вращения для ряда активных веществ при температуре 20°С. Рис. 1.15 поясняет причину вращения плоскости поляризации вектора **E** при распространении волны в веществе.

Линейно поляризованная волна является суперпозицией двух циркулярно поляризованных волн с противоположными направлениями вращения векторов ($\mathbf{E}_л$, $\mathbf{E}_п$) и одинаковыми амплитудами. Для не вращающих сред фазы $\varphi_л$ и $\varphi_п$ равны, и плоскость поляризации (положение вектора $\mathbf{E}_0$) не изменяется (рис.

1.15, *а*). Если скорости распространения лево- и правополяризованных волн не одинаковы, $\varphi_л \neq \varphi_п$ (рис. 1.15, *б*), плоскость поляризации поворачивается на угол

$$\varphi_и = \frac{\varphi_п - \varphi_л}{2} = \frac{\pi d}{\lambda}(n_п - n_л).$$

При соотношении между показателями преломления $n_п > n_л$ плоскость поляризации поворачивается вправо, при $n_п < n_л$ — влево.

Теория рассмотренного явления сводится к выяснению причин различия в скоростях распространения правого и левого лучей в активных телах. В ее основе лежит положение о существовании асимметричных молекул, в различных модификациях которых происходит различный поворот плоскости поляризации электромагнитной волны.

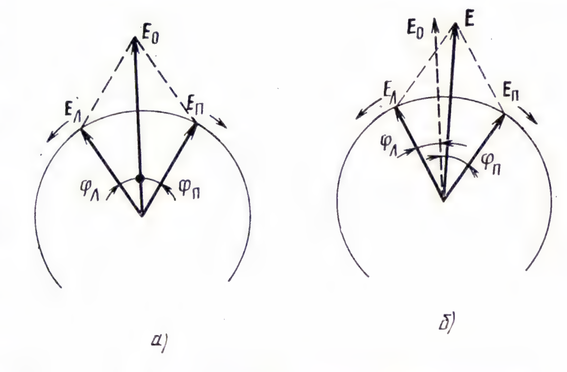


Рис. 1.15. К пояснению вращения плоскости поляризации волны

Современные способы исследования позволяют установить поворот плоскости поляризации в сотые доли градуса и находят применение для контроля концентрации растворов, при производстве никотина, кокаина и т. д.

В этом параграфе мы ознакомились с основными процессами, наблюдаемыми при распространении излучения в веществе: поглощением энергии излучения, зависимостью показателя поглощения от длины волны, изменением положения плоскости поляризации, используемыми при решении задач дефектоскопии и контроля состава веществ. Однако ими не исчерпываются явления, имеющие место при взаимодействии излучения с веществом. Важную роль среди них играет *процесс рассеяния излучения* — когерентного (без изменения частоты) и некогерентного (с изменением частоты). Упрощенно рассеяние можно трактовать как столкновение квантов излучения с элементарными частицами вещества, в результате которого фотоны изменяют направление своего движения. Характер рассеяния зависит от многих факторов: вида столкновения (упругое, неупругое), длины волны, плотности вещества, амплитуды колебаний элементарных частиц, анизотропии молекул и т. д. Соотношение раз-

меров неоднородностей с длиной волны является одним из общих признаков классификации механизмов рассеяния.

Если размер частиц мал по сравнению с длиной волны, а расстояние между ними больше длины волны и они беспорядочно расположены в пространстве, то имеет место так называемое *рэлеевское рассеяние,* когда коэффициент ослабления потока за счет рассеяния

$$\alpha'_\lambda = \frac{\pi^2(n^2-1)^2}{2N\lambda^4}(1-\cos^2\varphi),$$

где n — показатель преломления вещества микрочастицы; N — число частиц в единице объема; φ — угол между направлениями падающего и рассеянного излучения; $1-\cos^2\varphi$ — так называемая *индикатриса рассеяния,* характеризующая распределение силы излучения в зависимости от направления рассеяния (рис. 1.16, *а*).

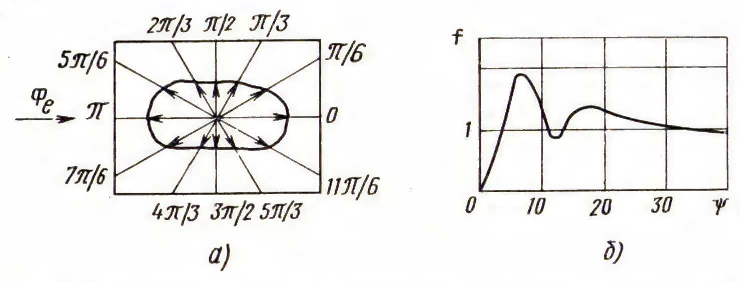


Рис. 1.16. Индикатриса рассеяния излучения частицами, малыми по сравнению с длиной волны λ (*а*), и функция Страттона — Хаутона (*б*)

Когда размеры рассеивающих диэлектрических частиц сравнимы с длиной волны, ослабление потока за счет рассеяния определяется выражением

$$\alpha'_\lambda = 2\pi r_и^2 N f(\psi), \qquad (1.56)$$

где $r_и$ — радиус частиц; $\psi = 2\pi r_и/\lambda$; $f(\psi)$ — *функция Страттона — Хаутона* (рис. 1.16, *б*).

В общей теории поглощения и рассеяния излучения малыми однородными частицами простой геометрической формы принято, что диэлектрическая сферическая частица не поглощает излучение, электропроводная сферическая частица частично поглощает, частично рассеивает, частично пропускает падающее излучение. Решение для амплитуды рассеянной волны имеет вид сложных рядов, содержащих функции Риккати — Бесселя и функции Риккати — Ганкеля возрастающего порядка. Приведенные формулы показывают, что рассеянное излучение являет-

ся носителем информации о физических параметрах вещества и может быть использовано для их контроля при одностороннем доступе к ОК.

Задачи

1.4.1. Сравнить степень затухания излучения с $\lambda=10$ мкм и $\lambda=1$ мм при распространении в ОК, удельная электрическая проводимость которого $\gamma=10^4$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$.

Решение

Пользуясь уравнением Хагена — Рубенса (см. § 1.3): $n=\varkappa=\sqrt{0,003\lambda\gamma}$ и выражением (1.43) с учетом равенства $\alpha_{\lambda п}=4\pi\varkappa x/\lambda$, несложно определить плотность потока энергии:

$$\frac{J(\lambda=10\text{ мкм};\ x=10\text{ мкм})}{J_0}=3\cdot 10^{-10};\quad \frac{J(\lambda=1\text{ мм};\ x=10\text{ мкм})}{J_0}=0,8.$$

На пути длиной 10 мкм излучение длиной волны $\lambda=10$ мкм практически полностью поглощается, длиной волны $\lambda=1$ мм незначительно ослабляется. Этим примером подтверждается справедливость ранее высказанного утверждения об увеличении прозрачности диэлектриков с ростом длины падающего излучения.

1.4.2. Определить угол поворота плоскости поляризации волны ($\lambda=4$ мкм) при прохождении кварцевой пластины толщиной 1 см.

Ответ: 2,63°.

§ 1.5. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯМИ

Длина пути распространения электромагнитных волн от точек поверхности ОК до плоскости изображения различна, и по разности хода лучей в системе ОК — плоскость регистрации излучения можно сделать заключение о качестве поверхности ОК (волнистость, шероховатость), зарегистрировать температурные деформации изделия, выявить очень слабые по амплитуде вибрации технических конструкций и т. д. Эти задачи решаются методом голографического (от греч. hólos — весь, полный и grapho — пишу) контроля.

Основу голографического контроля составляют способы регистрации разности хода лучей (сложного фронта волны) и способы извлечения зарегистрированной информации для анализа (восстановления волнового фронта) [4].

Первая группа способов основана на возможности представления разности фаз двух электромагнитных волн в виде распределения амплитуд в результате их взаимодействия. Поясним это на примере. Если на фотопластинку одновременно воздействуют две плоские волны *1* и *2* (рис. 1.17, *а*), то результат интерференции этих двух волн можно представить выражением для плотности потока энергии в плоскости пластинки (см. § 1.1):

$$J(z)=J_1+J_2+2\sqrt{J_1J_2}\cos k_в\Delta(z), \tag{1.57}$$

где J_1 и J_2 — плотности потока энергии соответственно волн *1* и *2*; $k_в=2\pi/\lambda$ — волновое число; $\Delta(z)=z\sin\beta'$ — разность хода (точка $z=0$ соответствует условию $\Delta=0$).

Расстояние между двумя соседними экстремумами функции $J(z)$ определяется выражением

$$d_и=2\pi/(k_в \sin\beta')=\lambda/\sin\beta'.$$

Проявленная фотопластинка с изображением, соответствующим распределению $J(z)$, названа *голограммой*. Она содержит информацию о разности фаз волны *1* (назовем ее опорной) и волны *2* (назовем ее сигнальной).

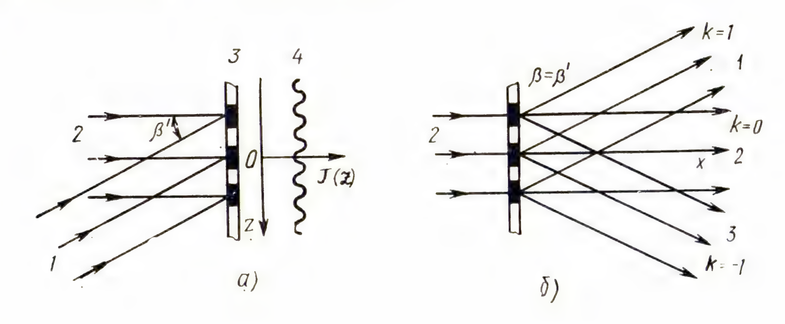


Рис. 1.17. К пояснению принципа регистрации и восстановления волнового фронта

Почернение фотопластинки [формула (1.57)] соответствует функции пропускания излучения дифракционной решеткой. Известно, что при освещении дифракционной решетки электромагнитной волной *2* (рис. 1.17) на ее выходе формируются три волны: полностью идентичная *2* ($k=0$), волна *1* ($k=1$) и волна *3* ($k=-1$), отличающаяся от первых двух.

Действительно, обозначая сигнальную и опорную волны через E_c и $E_{оп}$, получим

$$E_c=E_{c0}\exp[j(\omega t-k_в x)],\ E_{оп}=E_{00}\exp[j(\omega t-k_x x-k_z z)].$$

Учитывая, что $k_z=k_в\sin\beta$, $k_x=k_в\cos\beta\simeq k_в$ (при малых β), получим выражение для амплитуды напряженности электромагнитной волны в плоскости фотопластинки

$$E=E_c+E_{оп}=\exp j(\omega t-k_в x)[E_{c0}+E_{00}\exp(-jk_в z\sin\beta)] \quad (1.58)$$

и соответствующее распределение плотности потока энергии

$$J(z)=0{,}5\,|E|^2=0{,}5[E_{c0}^2+E_{00}^2+2E_{c0}E_{00}\cos(k_в z\sin\beta)]. \quad (1.59)$$

Коэффициент пропускания проявленной фотопластинки [5]

$$\tau_ф = (\mid E \mid ^2)^{-\gamma_ф/2}, \qquad (1.60)$$

где $\gamma_ф$ — коэффициент контрастности фотонегатива. Подставляя в (1.60) выражение для плотности потока энергии излучения в плоскости фотопластинки (1.59), получаем

$$\tau_ф = [E_{c0}^2 + E_{00}^2 + 2E_{c0}E_{00} \cos(k_в z \sin\beta)]^{-\gamma_ф/2}. \qquad (1.61)$$

Подбирая параметр $\gamma_ф$, можно добиться, чтобы пропускание $\tau_ф$ было пропорционально плотности потока энергии J. Одним из путей реализации этого условия может служить получение с помощью контактной печати позитива с коэффициентом контрастности $\gamma_п$ и обеспечение (соответствующей химической обработкой) равенства $\gamma_ф\gamma_п = 2$. Тогда

$$\tau_п = \left[(E^2)^{-\gamma_ф/2}\right]^{-\gamma_п} = J. \qquad (1.62)$$

При некоторых ограничениях условие (1.62) вытекает из (1.61). Действительно, представив выражение (1.61) в виде

$$\tau_ф = E_{00}^{-\gamma_ф}\left[1 + \frac{E_{c0}^2}{E_{00}^2} + \frac{2E_{c0}}{E_{00}} \cos(k_в z \sin\beta)\right]^{-\gamma_ф/2},$$

после разложения второго сомножителя в ряд Тейлора и отбрасывания всех членов ряда выше второго порядка при условии $E_{c0} \ll E_{00}$ и имеем

$$\tau_ф \approx E_{00}^{-\gamma_ф}\left[1 - \gamma_ф \frac{E_{c0}^2}{2E_{00}^2} - \gamma_ф \frac{E_{c0}}{E_{00}} \cos(k_в z \sin\beta)\right] =$$

$$= 0{,}5E_{00}^{-\gamma_ф - 2}[2E_{00}^2 - \gamma_ф E_{c0}^2 - 2\gamma_{00} E_{00} E_{c0} \cos(k_в z \sin\beta)]. \qquad (1.63)$$

Отбрасывая несущественный для дальнейшего рассмотрения масштабный множитель $E_{00}^{-\gamma_ф - 2}/2$ и учитывая равенство $\cos x = 0{,}5[\exp jx + \exp(-jx)]$, окончательно записываем

$$\tau_ф \sim 2E_{00}^2 - \gamma_ф E_{c0}^2 - \gamma_ф E_{00} E_{c0} \exp(\mathrm{j} k_в z \sin\beta) -$$

$$- \gamma_ф E_{00} E_{c0} \exp(-\mathrm{j} k_в z \sin\beta) \qquad (1.64)$$

($\sim$ — знак пропорциональности).

При падении на голограмму (1.64) плоской волны вида

$$E_в = E_{в0} \exp[\mathrm{j}(\omega t - k_в x)] \qquad (1.65)$$

формируется электромагнитное поле

$$\tau_ф E_в = E_{в0}(2E_{00}^2 - \gamma_ф E_{c0}^2) \exp[\mathrm{j}(\omega t - k_в x)] -$$

$$- \gamma_ф E_{00} E_{c0} E_{в0} \exp[\mathrm{j}(\omega t - k_в x + k_в z \sin\beta)] -$$

$$- \gamma_ф E_{00} E_{c0} E_{в0} \exp \mathrm{j}(\omega t - k_в x - k_в z \sin\beta),$$

образованное тремя плоскими волнами. Первая из них распространяется в направлении оси x и соответствует восстанавливающей волне (1.65) с измененной амплитудой. Остальные две распространяются под углом β к оси x, образуя действительное и мнимое изображение предмета.

Таким образом, использование опорной волны позволяет зарегистрировать фронт сигнальной волны на фотопластинке. Для восстановления фронта сигнальной волны проявленную фотопластинку освещают восстанавливающей волной, идентичной опорной.

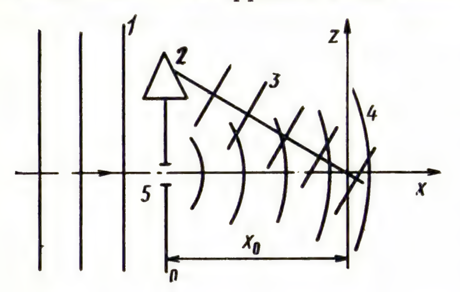


Рис. 1.18. Схема получения голограммы точечного объекта:

1 — фронт падающей волны; *2* — призма; *3* — фронт опорной волны; *4* — фронт сферической волны; *5* — точечное отверстие

Поверхность ОК можно представить как совокупность точек, по-разному рассеивающих падающее на них излучение. Зная процесс формирования и восстановления голограммы от точки, можно на основе принципа суперпозиции перейти к описанию голографического процесса для предмета в целом.

Механизм получения голограммы точечного объекта иллюстрирует рис. 1.18. Плоская волна *1* при прохождении через призму *2*, изменив направление распространения *3*, достигает регистрирующей среды, размещенной в плоскости $y0z$. Та же волна, взаимодействуя с точечным отверстием в плоскости *5*, преобразуется в сферическую волну *4*. Волна *3* используется в качестве опорной:

$$E_{\text{оп}} = E_{00} \exp \mathrm{j}\,[\omega t - k_{\text{в}} x - k_{\text{в}} z \sin\beta]. \qquad (1.66)$$

Если пренебречь незначительным изменением амплитуды напряженности сферической волны вдоль оси z на расстоянии x_0, то сигнальную волну от точки можно записать в виде

$$E_{\text{оп}} = E_{c0} \exp [j\,(\omega t - k_{\text{в}} x - k_{\text{в}} z \sin\beta)]. \qquad (1.67)$$

Складывая (1.65) и (1.66) и переходя к плотности потока энергии (1.11), получаем в плоскости $x0y$ на расстоянии x_0 от точечного источника

$$J = E_{00}^2 + E_{c0}^2 + 2E_{c0} \cos\,(k_{\text{в}} z \,\sin\beta - k_{\text{в}} z^2/2x_0). \qquad (1.68)$$

Если z не превышает существенно длину волны λ и угол β не очень мал, то $k_{\text{в}} z \sin\beta \gg k_{\text{в}} z^2/2x_0$ и плотность потока энергии полны (1.68) с ростом z изменяется почти по косинусоидальному закону. На фотопластинке формируется изображение в виде концентрических окружностей, причем при переходе от од-

ного кольца к другому разность хода между интерферирующими волнами увеличивается на одну длину волны. Такая система концентрических окружностей названа *зонной решеткой*.

Таким образом, голограмма светящейся точки представляет ряд концентрических колец с плавным переходом от светлых колец к темным примерно по косинусоидальному закону. Для восстановления зарегистрированной волны голограмму освещают тем же источником излучения [см. (1.64)]. В результате формируется электромагнитное поле, описываемое уравнением

$$\tau_\text{ф} E_\text{в} = E_{\text{в}0}(2E_{00}^2 - \gamma_\text{ф} E_{c0}^2) \exp \mathrm{j}(\omega t - k_\text{в} x) -$$
$$- \gamma_\text{ф} E_{00} E_{c0} E_{\text{в}0} \exp \mathrm{j}(\omega t - k_\text{в} x + k_\text{в} z \sin \beta - k_\text{в} z^2/2x_0) -$$
$$- \gamma_\text{ф} E_{00} E_{c0} E_{\text{в}0} \exp \mathrm{j}(\omega t - k_\text{в} x - k_\text{в} z \sin \beta + k_\text{в} z^2/2x_0). \quad (1.69)$$

Первая составляющая (1.69) представляет плоскую волну, распространяющуюся в направлении x; вторая представляет сферическую волну, распространяющуюся под углом β к оси z в отрицательном направлении оси z (определяется членом $\mathrm{j}k_\text{в}z \times \sin\beta$ в экспоненте) с вогнутостью в направлении распространения (определяется членом $-\mathrm{j}k_\text{в}z^2/2x_0$). Фокус этой составляющей служит действительным изображением точечного объекта. Третья составляющая распространяется под углом β в направлении положительных значений оси z (определяется членом $-\mathrm{j}k_\text{в}z\sin\beta$). Эта составляющая описывает сферическую волну с вогнутостью, обратной направлению распространения (определяется членом $\mathrm{j}k_\text{в}z^2/2x_0$ в показателе экспоненты), и, следовательно, является расходящейся. Она дает мнимое изображение точечного объекта в той точке, в которой находился объект во время записи голограммы. Ощущение человека идентично тому, которое он испытывает при наблюдении точечного объекта в расходящейся сферической волне. Голограмму предмета следует рассматривать как наложение зонных решеток, формируемых каждой точкой. В результате получается сложная интерференционная картина, но благодаря независимости зонных решеток при восстановлении сформируется фронт волны от всего предмета.

В 1962 г. советский ученый Ю. Н. Денисюк предложил *метод толстослойных голограмм*. Тонкая фотопластинка позволяет зарегистрировать интерференционное поле опорной и сигнальной волн в одном его сечении, информация о распределении плотности потока энергии электромагнитного поля в соседних сечениях теряется. С увеличением толщины фотопластинки на ней зарегистрируются другие сечения, формируется трехмерная структура почернений.

Формирование объемной голограммы поясняет рис. 1.19, *а*. Фотопластинка освещается опорной и сигнальной плоскими волнами, характеризуемыми волновыми векторами $\mathbf{k}_{в0}$ и $\mathbf{k}_в$. Распределение плотности потока энергии

$$|E^2|^2 = E_{00}^2 + E_{c0}^2 + 2E_{00}E_{c0}\cos[(\mathbf{k}_{в0} - \mathbf{k}_в)\mathbf{r}]$$

имеет максимумы в точках

$$(\mathbf{k}_{в0} - \mathbf{k}_в)\mathbf{r} = 2\pi k, \ k = 0, \ \pm 1, \ \pm 2, \ \ldots, \quad (1.70)$$

совокупность которых представляет систему плоскостей, перпендикулярных вектору $\mathbf{k}_{в0} - \mathbf{k}_в$. Вектор $\mathbf{r}$ определяет положение произвольной точки пространства. На основании соотношения (1.70) и условия $|\mathbf{k}_в| = |\mathbf{k}_{в0}|$ получаем

$$|\mathbf{k}_{в0} - \mathbf{k}_в| = 2\pi/d' = 2k\sin(\beta/2), \quad (1.71)$$

из которого находится расстояние между соседними плоскостями максимального почернения $d' = \lambda/[2\sin(\beta/2)]$.

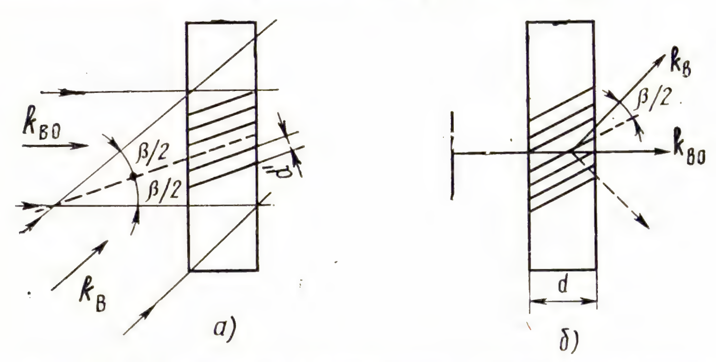


Рис. 1.19. К пояснению формирования объемной голограммы:
а — запись; *б* — восстановление голограммы

На рис. 1.19 плоскости почернения условно обозначены сплошными линиями. Такая голограмма является периодической трехмерной структурой, и в соответствии с *законом Вульфа — Брэгга*: $2d'\cos\beta = k\lambda$ при показателе преломления $n = 1$ при воздействии на нее восстанавливающей волны должна формироваться дифрагированная волна в направлении зеркального отражения от слоев почернения (рис. 1.19, *б*). Это справедливо при $d \gg d'$, где d — толщина фотопластинки.

Этот вывод вытекает из прямых вычислений, его физическая трактовка основана на том, что при выполнении условия $d \gg d'$ волны первого порядка, зарождающиеся в последовательных слоях фотоэмульсии, взаимно гасят друг друга. При использовании обычных фотоматериалов в оптическом диапазоне длин волн толщина d оказывается соизмеримой с шагом решетки d',

и в восстановленной голограмме присутствуют как главное, так и дополнительное изображение. Однако при интерференции встречных волн ($\beta=180°$) условие $d \gg d'$ выполняется с большим запасом, и наблюдается только одно голографическое изображение.

Голографический метод используется для контроля деформаций ОК при различных температурах. На одну и ту же фотопластинку последовательно во времени записываются две голограммы контролируемого изделия. Одна голограмма отражает, например, состояние изделия при температуре T_1, другая — при T_2. Из-за теплового расширения происходят микроизменения геометрических параметров ОК.

При восстановлении такой «двойной» голограммы формируются две волны, которые когерентны и интерферируют между собой. Если за время между экспозициями состояние изделия не изменилось, получим усиленное, но не измененное изображение объекта. В противном случае изображение будет покрыто интерференционными полосами, отражающими характер происшедших изменений, которые и определили разность хода лучей.

В другом варианте голограмма изготавливается для определенного состояния объекта. Затем ее помещают точно в то же место, в котором она находилась при регистрации, и освещают объект, как и на первом этапе голографирования. При наличии изменений в состоянии объекта между волновыми фронтами голографического изображения и от объекта возникает разность хода, и воспринимаемая картина оказывается покрытой интерференционными полосами. Описанный способ лежит в основе контроля деформаций предметов в процессе эксплуатации и позволяет вести контроль в реальном масштабе времени. На его основе созданы системы для контроля распределения упругих напряжений и температур в твердых телах, для изучения вибраций, перемещений, вращений ОК, для оценки точности обработки деталей.

В последнем случае требуется иметь объемное изображение предмета, который еще не изготовлен и, следовательно, отсутствует его голограмма. В подобных ситуациях с помощью ЭВМ синтезируется цифровая голограмма сконструированного изделия, которая известными системами формирования изображения, связанными с центральным процессором, переносится на фотопластинку. Цифровая голограмма восстанавливается обычным способом и используется как образец, с которым голографическим методом производится сравнение изготовленных объектов. Поскольку метод характеризуется точностью до долей длины волны, областью его применения может служить контроль очень сложных поверхностей в условиях жестких требований к соблюдению заданных нормативной документацией геометрических соотношений. В другом варианте реализации мето-

да полученная голограмма изготовленного предмета преобразуется в машинные коды, вводится в ЭВМ, где производится сравнение синтезированной и введенной голограмм.

Следует еще раз подчеркнуть, что область применения голографического метода — прецизионный контроль геометрических и частично физических характеристик веществ, материалов и изделий.

Задачи и контрольные вопросы

1.5.1. Оценить разрешающую способность фотографических пластинок, используемых для записи голограмм.

Решение

В голограмме (1.58) максимумы почернения формируются при выполнении условия $z \cos k_в \sin \beta = 1$. Расстояние Δz между максимумами функции $J(z)$ находится из выражения $k_в \Delta z \sin \beta = 2\pi$. Отсюда следует, что разрешающая способность фотопластинки $\Delta x = \lambda / \sin \beta$.

Так, при $\beta = 15°$ $\sin \beta = 0{,}26$. Если используется когерентное излучение с длиной волны $\lambda = 1$ мкм, то пластинка должна разрешать линии, расположенные на расстоянии $\Delta x \approx 4$ мкм. Разрешающая способность фотопластинки обычно выражается числом различимых линий на 1 мм длины. В приведенном примере требуемая разрешающая способность более 250 лин/мм.

1.5.2. В чем состоит основная идея голографического контроля?

1.5.3. Как восстанавливается информация, зарегистрированная на голограмме?

1.5.4. Какими преимуществами обладает голография по сравнению с обычной фотографией?

1.5.5. Какой вид имеют интерференционные полосы на голограмме точечного источника?

1.5.6. Какими преимуществами обладают толстослойные голограммы?

§ 1.6. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ОБЪЕКТОМ КОНТРОЛЯ

Применение ионизирующих излучений для НК базируется на взаимодействии их с ОК — на поглощении, рассеянии излучения веществом, ионизации вещества излучением. Поглощение и рассеяние характерно и для длинноволнового излучения при его распространении в ОК, однако механизм проявления этих эффектов отличается от рассмотренного. При больших энергиях фотоны взаимодействуют как со свободными электронами, так и с электронными оболочками и ядром атома.

Если энергия падающего фотона $h\nu \leqslant 0{,}08$ пДж (1 пДж $= 10^{-12}$ Дж), то наблюдается преимущественное его поглощение в результате *фотоэлектрического эффекта*. Сущность фотоэффекта состоит в том, что энергия фотона затрачивается на вырывание электронов (так называемых фотоэлектронов) из атома вещества и сообщение им кинетической энергии. Процесс

описывается уравнением баланса энергии: $h\nu = W_э + W_v$, где $W_э$ — работа вырывания электрона;

$$W_v = m_0 c^2 ([1-(v_e/c)^2]^{-0.5} - 1) \qquad (1.72)$$

— кинетическая энергия фотоэлектрона; v_e — скорость электрона; m_0 — масса покоящегося электрона.

С увеличением частоты фотона ν наряду с ионизацией в наружном слое за счет перехода периферических электронов (с внешних оболочек) в несвязанное состояние появляются свободные электроны, вырванные с внутренних оболочек атомов. Последнее приводит к возникновению так называемого *характеристического излучения* атомами вещества.

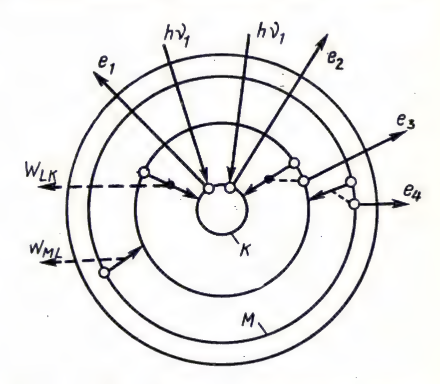


Рис. 1.20. Схема поглощения фотонов с испусканием характеристического излучения (слева) и с испусканием электронов второго рода (справа)

Электронные слои, или оболочки атома, обозначаются буквами *K, L, M, N, O, P*. Ближайший к ядру слой *K* характеризуется только одним уровнем энергии, слои *L* и *P* — тремя, слои *M* и *O* — пятью, слой *N* — семью. В зависимости от атомного номера *Z* число стационарных уровней энергии изменяется от 1 до 24.

При вырывании электрона освободившееся место не остается пустым, на него переходит электрон с одного из вышележащих уровней энергии. Этот процесс сопровождается испусканием фотона частотой $\nu = (W_i - W_j)/h$. Переходы электронов на уровень *K* дают линии характеристического *K*-излучения, переходы на уровни *L* — линии *L*-излучения и т. д. Работа вырывания электрона из слоя *L* меньше работы вырывания из слоя *K*, поэтому частота характеристического *K*-излучения больше частоты *L*-излучения и тем более *M*-, *N*-излучений и т. д. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, рассмотренная схема поглощения фотонов (слева на рис. 1.20) не является единственной.

Возможно также развитие процесса поглощения по другой схеме (справа на рис. 1.20).

Энергия, возникающая при переходе электрона с верхнего уровня на нижний, расходуется на вырывание электрона (e_2—e_4) с вышестоящей оболочки. На освободившееся место переходит электрон с еще более вышестоящего (по отношению к нему) слоя, формируется фотон, соответствующий этому переходу, вырывается новый электрон с вышестоящей оболочки

и т. д. Таким образом, процесс поглощения первичного фотона $h\nu_1$ может сопровождаться испусканием атомом фотоэлектрона первого (e_1) и второго рода (e_2, e_3).

Развитие процесса взаимодействия фотонов с веществом по пути сложного фотоэффекта чаще наблюдается в атомах с малым атомным номером. Так, у аргона только 7% переходов совершается лучеиспусканием, у криптона — 40%, у молибдена — 68%, остальная часть поглощенной энергии расходуется на многократную ионизацию без лучеиспускания.

С ростом частоты ν все больше начинает проявляться эффект рассеяния — *комптон-эффект* — падающих фотонов. В результате столкновения фотона с внешними атомными электронами образуется новый квант с меньшей энергией и из вещества вылетает электрон (так называемый «электрон отдачи») с энергией $h\nu—h\nu_s$. Такая ситуация соответствует случаю, когда падающий квант взаимодействует с неподвижным свободным электроном. Если связь электрона с атомом велика (разность $h\nu—h\nu_s$ отрицательна), то возможно отклонение кванта от первоначального направления распространения без изменения его энергии (когерентное рассеяние).

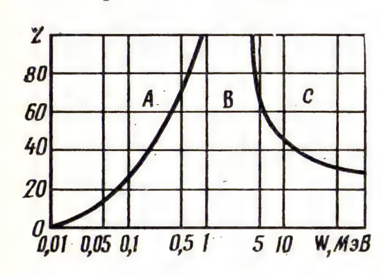


Рис. 1.21. Диаграмма Эванса:

A — область преобладания фотоэффекта; *B* — то же, комптон-эффекта; *C* — то же, эффекта образования пар

В первом случае длина волны рассеянного кванта (мкм) увеличивается на величину $4{,}86\cdot10^{-2}\sin^2(\varphi/2)\cdot10^{-4}$, т. е. в зависимости от направления рассеяния фотоны имеют различную энергию $h\nu_s$.

Энергия рассеянного кванта и электрона отдачи соответственно равна

$$h\nu_s = \frac{h\nu}{1 + h\nu(1 - \cos\varphi)/m_0c^2}, \quad W_v = \frac{(h\nu)^2(1 - \cos\varphi)}{m_0c^2 + h\nu(1 - \cos\varphi)}$$

и не зависит от свойств вещества. Эта особенность рассеянного излучения широко используется на практике, преимущественно в приборах технологического контроля. Комптон-эффект играет важную роль в ослаблении ионизирующих излучений средней энергии (0,1 ... 0,5 пДж) легкими веществами.

В случае, когда энергия квантов превышает двойную энергию покоя электрона (более $1{,}63\cdot10^{-13}$ Дж), кроме фотоэффекта и комптон-эффекта наблюдается новый вид взаимодействия фотона с веществом вблизи атомного ядра: поглощение фотона с образованием пары позитрон — электрон. Суммарная кинетическая энергия обеих частиц согласно закону сохранения энер-

гии равна $h\nu$, но она по-разному может быть распределена между ними. Наиболее вероятен случай равенства энергии. Образовавшиеся позитрон и электрон разлетаются в таких направлениях, чтобы геометрическая сумма их количеств движения плюс количество движения частицы, в поле которой образовалась пара, равнялась количеству движения фотона.

Как уже указывалось, каждый из рассмотренных эффектов взаимодействия излучения с веществом проявляется в разных областях на плоскости $Z - W$ (атомный номер поглощающего атома — энергия фотонов). Этот вывод иллюстрирует *диаграмма Эванса* (рис. 1.21). Для данного вещества в случае фотонов малых энергий основной вид взаимодействия — фотоэффект.

Таблица 1.5

Теоретическая и практическая предельная толщина пролета электронов

W, МэВ	v_e/c_0	x_{Al}, мм	x_{H_2O}, мм	$x_{возд}$, см	y_{Al}, мм	$y_{возд}$, см
0,10	54,8	0,125	0,34	41	0,08	26,0
0,15	63,5	0,220	0,60	73	0,15	50,0
0,20	69,5	0,310	0,84	103	0,20	65,0
0,25	74,2	0,420	1,13	140	0,29	95,0

С увеличением энергии падающих квантов преобладающую роль начинает играть вначале комптон-эффект, а затем эффект образования пар. Разделяющие графики на рис. 1.21 соответствуют равенству затухания проходящего в вещество излучения за счет рассмотренных эффектов. Исходя из приведенных на диаграмме данных, можно считать, что область преобладания фотоэффекта для алюминия простирается до 0,05 МэВ, для меди — до 0,15 МэВ, для свинца — до 0,5 МэВ. Комптон-эффект сильнее проявляется для тех же материалов соответственно в областях 0,05 ... 15; 0,15 ... 10 и 0,5 ... 5 МэВ.

До сих пор мы рассматривали первичные процессы, происходящие при прохождении фотона через вещество. Очевидно, возникшие после первого акта взаимодействия кванты рассеянного или характеристического излучения будут также взаимодействовать с веществом в соответствии с уже рассмотренными законами. Что касается свободных электронов, то при прохождении через вещество они теряют энергию на образование вторичных электронов, и процесс развивается до тех пор, пока не произойдет их присоединение к атомам с переходом сохранившейся энергии в тепло. Сравнительно редко результатом взаимодействия первичного электрона с атомом служит испускание кванта излучения.

Вторичные электроны имеют небольшие скорости, быстро захватываются атомами и в редких случаях могут вызвать появление более медленных третичных электронов, которые поглощаются веществом с выделением теплоты. Наибольшая толщина слоя, которую пролетают некоторые наиболее быстрые электроны, называется *предельной.* Данные табл. 1.5 дают представление как о теоретической предельной толщине x, так и практически принимаемой y (при поглощении 99% электронов).

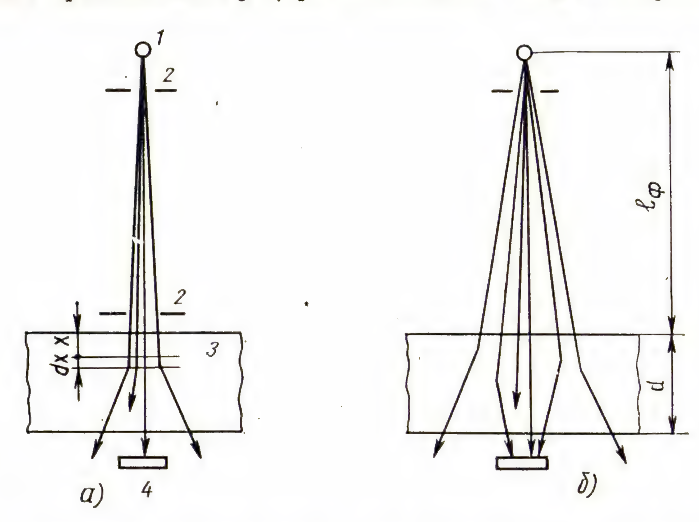


Рис. 1.22. Схема ослабления узкого (*а*) и широкого (*б*) пучков излучения: *1* — источник излучения; *2* — диафрагма; *3* — ОК; *4* — детектор

Узкий пучок можно создать с помощью диафрагм (рис. 1.22, *а*). Уменьшение плотности потока энергии такого пучка $dJ_{\lambda x}$ в элементарном слое dx, отстоящем от поверхности ОК на расстояние x,

$$-dJ_{\lambda x}=\mu_\lambda J_{\lambda x}dx, \tag{1.73}$$

где $J_{\lambda x}$ — плотность потока энергии пучка на входе в слой dx; μ_λ — спектральный коэффициент ослабления. После разделения переменных и интегрирования получаем

$$\int\limits_{J_{\lambda 0}}^{J_{\lambda d}} \frac{dJ_{\lambda x}}{J_{\lambda x}}=\int\limits_0^d \mu_\lambda dx; \;\; \ln\frac{J_{\lambda d}}{J_{\lambda 0}}=-\mu_\lambda d;$$

$$J_{\lambda d}=J_{\lambda 0}e^{-\mu_\lambda d}, \tag{1.74}$$

где $J_{\lambda 0}$ — плотность потока энергии падающих на ОК лучей; $J_{\lambda d}$ — плотность потока энергии прошедших ОК лучей; d — тол-

щина ОК. Выражение (1.74) описывает общий для фотонного излучения закон экспоненциального ослабления, или закон Бугера.

Поскольку ослабление распространяющегося пучка лучей вызвано несколькими причинами, коэффициент ослабления μ_λ можно представить в виде суммы: $\mu_\lambda = \alpha_\lambda + m_\lambda + \pi_\lambda$, где α_λ — спектральный коэффициент поглощения; m_λ — спектральный коэффициент рассеяния; π_λ — спектральный коэффициенг поглощения эффекта образования пар. Коэффициенты α_λ, m_λ, π_λ называют линейными в отличие от массовых: $\alpha_\lambda/\rho_в$, $m_\lambda/\rho_в$, $\pi_\lambda/\rho_в$, $\rho_в$ — плотность ОК. Для зависимости $\alpha_\lambda/\rho_в$ от длины волны характерно общее возрастание α_λ с увеличением длины волны и наличие резких скачков поглощения на определенных длинах волн (рис. 1.23). Первый скачок происходит на длине волны λ_K и обусловлен прекращением вырывания электронов из слоя K. На рис. 1.23 показаны также скачки спектрального коэффициента поглощения, определяемые L-слоем (λ_{L1}, λ_{L2}, λ_{L3}). Значения λ_K, λ_{L1}, λ_{L2}, λ_{L3}, λ_{M1}, ... могут служить признаком при идентификации вещества.

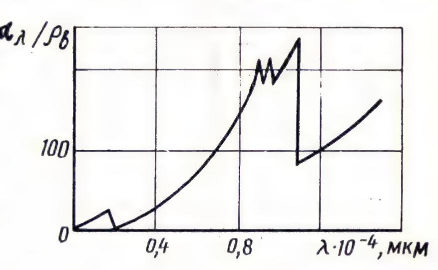


Рис. 1.23. Спектральная зависимость массового коэффициента поглощения платины

На рис. 1.24 приведены зависимости коэффициента ослабления ионизирующего излучения μ_λ и его составляющих α_λ, m_λ, π_λ от энергии фотонов (длины волны). Ясно просматривается тенденция уменьшения ослабления излучения с ростом его энергии до 5...10 МэВ. Затем наступает медленное увеличение коэффициента ослабления за счет эффекта образования пар. С ростом атомного номера Z минимум на зависимости коэффициента смещается в область меньших энергий.

До сих пор при описании физических явлений предполагалось, что ОК облучается монохроматическим излучением. На практике широко применяют источники со сплошным спектром излучения. Кроме того, для проведения контроля часто используют широкие (не диафрагмированные) пучки лучей (рис. 1.22, *б*). В том и другом случае зависимость плотности потока энергии падающего на ОК и выходящего из него излучения усложняется. Этот вывод следует из анализа функций $J_{\lambda 0} = f(\lambda)$ и $\mu_\lambda = f(\lambda)$, при подстановке которых в интеграл (при сохранении геометрии «узкого пучка») $J_x = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{\lambda 0} \exp(-\mu_\lambda x)\, d\lambda$ он не бе-

рется. Поэтому на практике часто используют следующий прием.

Вводят понятие эффективной плотности потока энергии излучения $J_{эф}$, под которой понимают плотность потока энергии такого монохроматического излучения, относительное ослабление которого в данном ОК заданной толщины d такое же, как и у используемого излучения сложного спектрального состава.

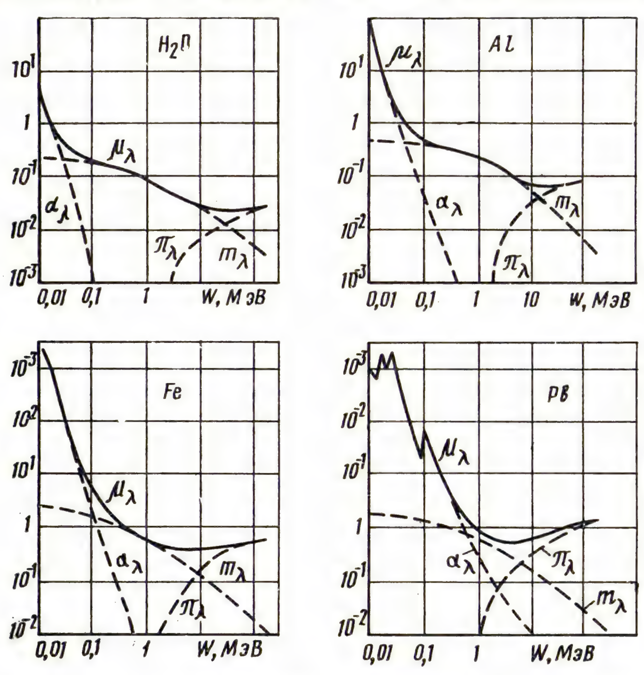


Рис. 1.24. Зависимость коэффициента ослабления и его составляющих от энергии фотонов

Возможность такого сопоставления обосновывается следующими рассуждениями. По мере проникновения пучка немонохроматического излучения в ОК отдельные спектральные составляющие ослабляются неодинаково. Общая плотность потока энергии в верхних слоях уменьшается быстрее, чем в нижних. Поэтому зависимость $f(x)=\lg(J_x/J_0)$ становится нелинейной (рис. 1.25). Коэффициент ослабления, определяемый тангенсом угла наклона касательной ($\operatorname{tg}\varphi$) в каждой точке кривой $f(x)$, по мере прохождения лучей уменьшается. В точке D плотность потока энергии общего пучка, как и моноэнергетическое излучение с начальной плотностью потока энергии J_{0D} (или длиной волны $\lambda_{эф}$), достигает значения J_D. Коэффициент ослабления $\mu_{эф}$, соответствующий этой длине волны, называют *эффективным*.

Очевидно, величины $\lambda_{эф}$ и $\mu_{эф}$ уменьшаются по мере проникновения монохроматического излучения в ОК и равны соответственно длине волны и коэффициенту ослабления тех фиктивных монохроматических лучей, которые определяют положения касательных в различных точках кривой $f(x)$. На кривых такого вида существует точка (G на рис. 1.25), ниже которой угол φ практически не меняется, и величины $\lambda_{эф}$ (или $J_{эф}$) и $\mu_{эф}$ можно считать неизменными. Тогда для данного ОК

$$J_x = J_{эф} \exp(-\mu_{эф} x), \quad x \geqslant x_G;$$
$$J_{эф} = J(x = x_G) + x_G \operatorname{tg} \varphi_G. \tag{1.75}$$

При проведении контроля с использованием широкого пучка (см. рис. 1.22, *б*) ослабление луча, распространяющегося в определенном направлении (x, y), отчасти компенсируется рассеянным излучением от соседних направлений, так что плотность потока энергии, попадающего на детектор потока энергии (или $J_в$), больше, чем J_d ($J_{d\,эф}$). Коэффициент $B_н = J_в / J_D$ называют *фактором накопления*. Тогда

$$J_в(x) = B_н J_{эф} \exp(-\mu_{эф} x), \tag{1.76}$$

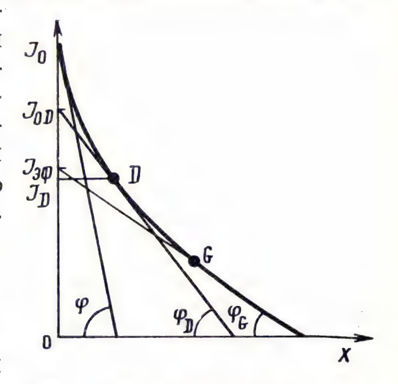


Рис. 1.25. Кривая поглощения неоднородного пучка ионизирующих излучений

причем $J_{эф}$ и $\mu_{эф}$ определены для геометрии узкого пучка. Коэффициент $B_н$ оценивается либо расчетным путем (на основе решения интегро-дифференциального уравнения переноса излучения через ОК), либо экспериментально. Если условие $d \ll l_ф$ не выполняется (см. рис. 1.22, *б*), то в правую часть уравнения (1.76) необходимо ввести дополнительный множитель $l_ф^2/(l_ф + d)^2$, учитывающий уменьшение $J(x)$, обусловленное расхождением пучка.

Следует ожидать, что на границе раздела сред будут проявляться эффекты отражения и преломления лучей, подобные оптическим. В § 1.4 указывалось, что проявляются эти эффекты незначительно. Тем не менее при определенных условиях их удается зарегистрировать и использовать при решении некоторых практических задач.

Как известно, кристалл состоит из ряда параллельных атомных плоскостей, находящихся на одинаковом расстоянии d друг от друга (рис. 1.26). Если разность хода отраженных от атомных плоскостей 1, 2, 3, ... монохроматических лучей A_1, A_2, A_3, ...

в точке C кратна длине их волны k, где $k=0, 1, 2, \ldots$, они усилятся (произойдет суммирование волн), и итоговое излучение удастся зарегистрировать. Из рис. 1.26 следует, что разность хода лучей от двух смежных плоскостей $DN=2d \sin \varphi$, т. е. суммирование произойдет при условии

$$k_\lambda=2d \sin \varphi. \tag{1.77}$$

Выражение (1.77), называемое *уравнением Вульфа — Брэгга*, используется при исследовании структуры кристаллических ОК. Из этого уравнения также следует, что падающий на кристалл монохроматический пучок отражается только при определенном угле φ, удовлетворяющем условию (1.77). Если же падающий пучок содержит лучи различных длин волн, то при заданном угле φ отражаются лучи тех длин волн, которые удовлетворяют уравнению Вульфа — Брэгга. Явление отражения ионизирующих лучей используется для монохроматизации широкополосных излучений в приборах радиационного контроля.

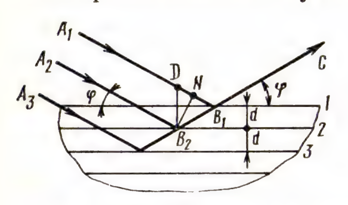


Рис. 1.26. К выводу уравнения Вульфа — Брэгга

В уравнении (1.77) целое число k определяет так называемый порядок отражения. Если разность хода составляет одну длину волны, речь идет об отражении первого порядка, при $k=2$ — об отражении второго порядка и т. д.

При выводе формулы Вульфа — Брэгга предполагалось, что показатель преломления лучей равен единице. В действительности же он несколько меньше единицы: $n=1-\delta$, где δ — величина порядка 10^{-5} (для рентгеновских лучей с $\lambda \simeq 10^{-10}$ м). С учетом этого при точных расчетах пользуются модифицированным вариантом выражения (1.77): $k\lambda=2d \sin \varphi (1-\delta/\sin^2 \varphi)$. Очевидно, что при $n=1-\delta=\cos \varphi$ должно наблюдаться полное внутреннее отражение, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

Задачи и контрольные вопросы

1.6.1. Определить, насколько изменится длина волны рассеянного фотона при столкновении падающего фотона со свободным электроном, если углы отклонения распространения фотона $h\nu_s$ и электрона e относительно направления движения фотона $h\nu$ составят соответственно φ и ψ.

Решение

Поставленная задача может быть решена с использованием законов сохранения энергии и количества движения. Согласно закону сохранения ко-

личества движения выражения для импульса падающего фотона в направлении распространения имеет вид

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu_s}{c} \cos\varphi + \frac{m_0 v_e}{\sqrt{1-(v_e/c)^2}} \cos\psi, \tag{1.78}$$

а в перпендикулярном направлении

$$\frac{h\nu_s}{c} \sin\varphi + \frac{m_0 v_e}{\sqrt{1-(v_e/c)^2}} \sin\psi = 0, \tag{1.79}$$

где m_0 — масса покоящегося электрона. Второй член уравнений (1.78), (1.79) записан с учетом известного соотношения для массы электрона, получившего в результате акта рассеяния скорость v_e: $m_e = m_0/\sqrt{1-(v_e/c)^2}$.

Вводя обозначение $(h\nu/m_0c^2) = A_\nu$ $(h\nu_s/m_0c^2) = A'_\nu$, перепишем (1.78), (1.79) в виде

$$A_\nu = A'_\nu \cos\varphi + \frac{v_e/c}{\sqrt{1-(v_e/c)^2}} \cos\psi, \tag{1.80}$$

$$A'_\nu \cos\varphi + \frac{v_e/c}{\sqrt{1-(v_e/c)^2}} \sin\psi = 0. \tag{1.81}$$

Из закона сохранения энергии следует выражение

$$h\nu - h\nu_s = W_v = m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-(v_e/c)^2}} - 1\right), \tag{1.82}$$

где W_v описывается выражением (1.72). Уравнение (1.82) можно записать в виде

$$A_\nu - A'_\nu = \frac{1}{\sqrt{1-(v_e/c)^2}} - 1. \tag{1.83}$$

Комбинируя выражения (1.80)—(1.82), можно решить поставленную задачу. Обычно этот процесс выглядит следующим образом.

Уравнения (1.80) и (1.81) возводят в квадрат, а затем складывают:

$$(A_\nu - A'_\nu \cos\varphi)^2 = \frac{(v_e/c)^2}{1-(v_e/c)^2} \cos\psi;$$

$$A'_\nu \sin^2\varphi = \frac{(v_e/c)^2}{1-(v_e/c)^2} \sin^2\psi; \tag{1.84}$$

$$\frac{(v_e/c)^2}{1-(v_e/c)^2} = A_\nu^2 - 2A_\nu A'_\nu \cos\varphi + \left(A'_\nu\right)^2 \sin^2\varphi = A_\nu^2 + $$

$$+ \left(A'_\nu\right)^2 - 2A_\nu A'_\nu \cos\varphi.$$

Прибавляя к обеим частям (1.84) по единице и подставляя полученный результат в возведенное в квадрат уравнение (1.83), получаем уравнение

$$\left(A_\nu - A'_\nu + 1\right)^2 = 1 + A_\nu^2 + \left(A'_\nu\right)^2 - 2A_\nu A'_\nu \cos\varphi,$$

из которого следует

$$A'_\nu = \frac{A_\nu}{1 + A_\nu(1 - \cos\ \varphi)} \ . \tag{1.85}$$

Учитывая, что $\nu = c/\lambda$ и заменяя коэффициенты A'_ν и A_ν их выражениями, после несложных преобразований получаем выражение

$$\lambda_s = \lambda + \frac{h}{m_0 c}\ (1 - \cos\ \varphi) = \lambda + \frac{2h}{m_0 c}\ \sin^2 \frac{\varphi}{2},$$

из которого следует, что произошло изменение длины волны по сравнению с длиной волны падающего фотона на величину

$$\Delta\lambda = \lambda_s - \lambda = \frac{2h}{m_0 c}\ \sin^2 \frac{\varphi}{2} \ . \tag{1.86}$$

Подставляя числовые значения констант h, m_0, c в (1.86), окончательно получаем

$$\Delta\lambda = 4{,}86 \cdot 10^{-6}\ \sin^2 \frac{\varphi}{2}\ \text{мкм} = 4{,}86 \cdot 10^{-3}\ \sin^2 \frac{\varphi}{2}\ \text{нм}.$$

Максимальное изменение длины волны наблюдается при $\varphi = \pi$.

1.6.2. Вычислить энергию электрона отдачи, вектор скорости которого образует угол φ с направлением движения первичного кванта.

Основой для решения задачи служит уравнение (1.82):

$$W_v = h\nu\left(1 - \frac{h\nu_s}{h\nu}\right).$$

Подставляя в выражение (1.85) значения коэффициентов $A_\nu = (h\nu/m_0c^2)$; $A'_\nu(h\nu_s/m_0c^2)$, получаем

$$h\nu_s = \frac{h\nu m_0 c^2}{m_0 c^2 + h\nu\,(1 - \cos\ \varphi)} \ .$$

Тогда

$$W_v = \frac{(h\nu)^2\,(1 - \cos\ \varphi)}{m_0 c^2 + h\nu\,(1 - \cos\ \varphi)} = \frac{2\,(h\nu)^2 \sin^2\ (\varphi/2)}{m_0 c^2 + 2h\nu\ \sin^2\ (\varphi/2)} \ .$$

1.6.3. Объясните сущность явления фотоэффекта.

1.6.4. Какой механизм взаимодействия излучения с ОК ответствен за возникновение характеристического излучения?

1.6.5. Чем отличаются *K*- и *L*- излучения?

1.6.6. При каких условиях появляются «электроны отдачи»?

1.6.7. Чем отличается когерентное излучение от некогерентного?

1.6.8. При какой энергии наблюдается поглощение фотона с образованием пар?

1.6.9. Какому закону подчиняется процесс распространения электромагнитного излучения в ОК?

1.6.10. Чем вызвана необходимость введения понятий «эффективная длина волны» и «эффективный коэффициент ослабления»?

1.6.11. При каком условии наблюдается отражение рентгеновского излучения от границы раздела двух сред?

Глава 2

РАДИОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ

§ 2.1. ОСОБЕННОСТИ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ

Радиоволновой неразрушающий контроль основан на регистрации изменения параметров электромагнитных колебаний СВЧ, взаимодействующих с ОК. Диапазон длин волн, преимущественно используемый в радиоволновом контроле, ограничен 1 ... 100 мм. Более освоены и обеспечены измерительной аппаратурой 3-см и 8-мм поддиапазоны.

Радиоволновой контроль применяют для решения всех типовых задач НК: толщинометрии, дефектоскопии, структуроскопии и интроскопии (контроля внутреннего строения ОК) [1]. Используемая при этом аппаратура, как правило, построена на базе стандартных или модернизированных элементов СВЧ. Специальным элементом при решении конкретной задачи может быть источник или приемник излучения, а также приспособление для крепления и перемещения ОК.

Среди других особенностей радиоволнового контроля по сравнению с оптическим и радиационным следует отметить использование импедансного метода для расчета параметров сигналов и соизмеримость длины волны излучения с размерами радиоволнового тракта «источник излучения — объект контроля — приемник излучения».

Излучения СВЧ относятся к области радиоволн, которые с момента своего открытия использовались для передачи информации. Применение волн СВЧ для целей НК потребовало создания теории их взаимодействия с ОК. Вполне естественно, что в разработанной теории были учтены результаты, полученные в радиосвязи для волновых систем с распределенными параметрами (длинных линий, волноводов и др.) импедансным методом, в котором радиоволновой тракт «источник излучения — объект контроля — приемник излучения» заменяется моделью в виде длинной линии. При этом канал распространения колебаний СВЧ (двухпроводные линии, волноводы, свободное пространство) характеризуют *волновым сопротивлением* $z=\sqrt{\mu_a/\varepsilon_a}$, где μ_a и ε_a — соответственно абсолютные магнитная и диэлектрическая проницаемость среды. Для идеального диэлектрика оно вещественно и при $\varepsilon_r=1$ равно $z_0=377$ Ом.

Отношение $\gamma/(\omega\varepsilon_a)=\mathrm{tg}\,\delta$ называют *тангенсом угла диэлектрических потерь* и относят к важнейшим параметрам диэлектриков.

Здесь γ — удельная электрическая проводимость; ω — угловая частота. На одной частоте ($\mathrm{tg}\,\delta<0{,}01$) материал может считаться диэлектриком, на другой ($\mathrm{tg}\,\delta>100$) — проводником.

При расчетах к идеальным диэлектрикам относят материалы, для которых $\mathrm{tg}\,\delta<0{,}01$. На частотах, меньших $9\cdot10^6$ Гц, морскую воду относят к классу диэлектриков; на частотах, больших $9\cdot10^{10}$ Гц, — к классу проводников. В промежуточной области $0{,}01<\mathrm{tg}\,\delta<100$ материал называют несовершенным диэлектриком, характеризующимся комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_c=\varepsilon_a-j\gamma/\omega=\varepsilon_a-j\varepsilon'$$

и комплексным волновым сопротивлением $\underline{z_c}=\sqrt{\mu_a/\varepsilon_c}$. Модуль комплексного сопротивления

$$z_c=\sqrt{\mu_a/\sqrt{\varepsilon_a^2+(\varepsilon')^2}},$$

а аргумент $\varphi_z=-0{,}5\,\mathrm{arctg}\,(\varepsilon'/\varepsilon_a)$.

Значения ε_r и $\mathrm{tg}\,\delta$ различных сухих материалов приведены в [1].

Для проводников мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости велика по сравнению с вещественной частью: $\varepsilon'\gg\varepsilon_a$ и волновое сопротивление определяется выражением $z_c=\sqrt{\omega\mu_a/\gamma}$. С ростом частоты z_c увеличивается, и волны не могут глубоко проникать в проводник. Явление экранирования наружными слоями материала глубинных слоев от проникновения поля называют *скин-эффектом*. Он характеризуется глубиной проникновения плоской волны $\delta=\sqrt{2/(\omega\gamma\mu_a)}$, на которой напряженность полей E и H уменьшается в e раз.

Скорость распространения электромагнитной волны в несовершенном диэлектрике зависит от частоты

$$v=c\sqrt{2\left[1+\sqrt{1+(\varepsilon'/\varepsilon_a)^2}\right]^{-1}},$$

так как $\varepsilon'=\gamma/\omega$. Величина v характеризует скорость перемещения точек, сохраняющих одну и ту же фазу волны. Зависимость $v=f(\omega)$ называют *дисперсией*. В проводнике $v\approx\approx\sqrt{2\omega/(\mu_a\gamma)}$. Через скорость находится длина волны $\lambda=vT_\nu$; $T_\nu=1/\nu$; $\nu=\omega/(2\pi)$. Табл. 2.1 дает представление о значениях z_c, δ и λ проводящих материалов.

При переходе электромагнитной волны из одной среды в другую по нормали к граничной поверхности формируется отра-

женная волна. При наложении обеих волн образуется *стоячая волна,* характеризуемая *коэффициентом стоячей волны по напряжению* $k_{ст\,U} = E_{max}/E_{min}$ или *коэффициентом бегущей волны по напряжению* $k_{б\,U} = 1/k_{ст\,U}$. Максимумы стоячей волны получаются там, где действующие значения напряженности падающей и отраженной волн складываются, а минимумы — там, где они вычитаются. Следовательно,

$$k_{бU} = \frac{1}{k_{стU}} = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|}, \qquad |\rho| = \frac{1 - k_{бU}}{1 + k_{бU}},$$

где ρ — коэффициент отражения, определенный в § 1.3. В теории длинных линий этот коэффициент выражается через волновые сопротивления первой $\underline{z}_{c1}$ и второй $\underline{z}_{c2}$ сред:

$$\rho = (\underline{z}_{c2} - \underline{z}_{c1})/(\underline{z}_{c2} + \underline{z}_{c1}). \qquad (2.1)$$

Таблица 2.1

Параметры проводящих материалов на частоте 10^{10} Гц

Материал	Удельная проводимость, МСм/м	Длина волны, мкм	Z_c, Ом	δ, мкм
Медь	58	4,2	0,037	0,66
Алюминий	37,2	5,14	0,046	0,82
Вольфрам	18,1	7,41	0,066	1,18
Нихром	1,0	31,5	0,281	5,03
Графит	0,125	89,5	0,795	14,25

Формулы (1.39) и (2.1) указывают на возможность получить требуемый результат, основываясь на законах геометрической оптики или теории длинных линий. При применении второго подхода для расчета параметров сигналов СВЧ реальную систему «источник излучения — объект контроля — приемник» заменяют моделью в виде длинной линии с такими же волновыми сопротивлениями и размерами, как в реальной системе [6]. Вариант построения такой модели показан на рис. 2.1. Электромагнитные параметры слоев изделия (ε_i, μ_i, γ_i) учитываются через комплексные волновые сопротивления $\underline{z}_i$ отрезков длинной линии. Входное сопротивление приемника и выходное сопротивление источника излучения (генератора) учитываются волновыми сопротивлениями $\underline{z}_п$ и $\underline{z}_г$.

Дефект в виде расслоения заменяется в модели плоскопараллельным слоем такой же толщины, как дефект. Амплитуда сигнала от дефекта уменьшается пропорционально площади, занимаемой дефектом относительно площади контролируемой зоны.

Соизмеримость длины волны излучения СВЧ с размерами элементов радиоволнового тракта обусловливает сложный характер электромагнитного поля в системе контроля. По этой причине методика оценки сигналов в системе имеет характерную особенность. Если расстояние между границами различных однородных сред, составляющих ОК, превышает длину волны в материале, компоненты электромагнитной волны оценивают на основе законов геометрической оптики (см. § 1.3). В противном случае предпочтительнее применение импедансного метода. В обоих случаях получаемые оценки сигналов в системе приближенные и не исключено появление больших ошибок. Поэтому рекомендуется пользоваться расчетным методом для определения относительных значений величин — изменения амплитуд сигналов при малых изменениях параметров ОК или условий контроля. Что касается абсолютных значений сигналов, их следует оценивать экспериментально.

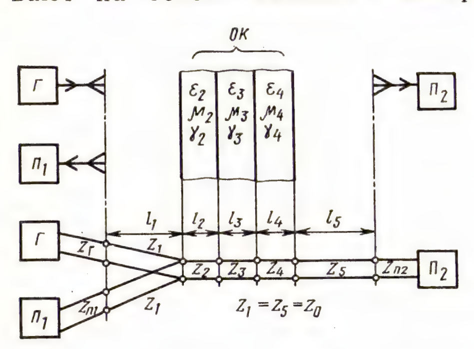


Рис. 2.1. Модель взаимодействия излучения СВЧ с трехслойной средой:
Г — генератор; П — приемник

Коротко остановимся на методах и средствах радиоволнового контроля. Если контролируемая величина непосредственно связана с напряженностью поля (мощностью) отраженного, прошедшего или рассеянного излучения, используется *амплитудный метод* контроля. Техническая реализация метода проста, однако невысокая помехоустойчивость ограничивает его применение. Более надежные результаты получают, используя *фазовый* и *амплитудно-фазовый методы*, основанные на выделении полезной информации, заключенной в изменениях амплитуды и фазы волны. Для выделения этой информации в аппаратуру контроля вводят опорное плечо «источник — приемник излучения» и схему сравнения сигналов от ОК с опорным.

Если толщина ОК превышает длину волны используемого зондирующего излучения, рекомендуется для ее измерения использовать *геометрический* или *временнóй метод*. В первом случае контролируемый параметр связан с отклонением положений отраженного луча в плоскости регистрации относительно выбранной системы координат, во втором — с изменением задержки сигнала во времени.

Для контроля тонкопленочных и анизотропных материалов применяют *поляризационный метод*, основанный на анализе изменений плоскости или вида поляризации колебаний после взаи-

модействия излучения с ОК. Перед испытаниями приемную антенну разворачивают до тех пор, пока сигнал на ее выходе от образцового ОК не станет равным нулю. Сигналы от испытываемых ОК характеризуют степень отклонения их свойств от образцового.

Голографический метод дает хорошие результаты при контроле внутреннего строения ОК, однако из-за сложности его аппаратурной реализации метод имеет ограниченное применение.

Радиоволновой контроль по прошедшему излучению позволяет обнаружить дефекты ОК, если их параметры μ_a и ε_a значительно отличаются от аналогичных параметров основного материала, а размеры соизмеримы или превышают длину волны зондирующего излучения. В простейшем варианте такого контроля в приемном тракте поддерживают режим бегущей волны. Наиболее полную информацию об ОК дает применение многоэлементных антенн, поскольку в этом случае удается воспроизвести внутреннюю структуру объекта. Для повышения разрешающей способности дефектоскопии используют метод самосравнения. Он реализуется с помощью двух комплектов излучающих и приемных устройств, максимально приближенных друг к другу. Результирующий сигнал определяется разностью амплитуд и фаз сигналов приемников каждого канала. Наличие дефекта приводит к изменению условий распространения волны в одном канале и появлению разностного сигнала.

Анализ динамики изменения сигнала при периодическом прохождении дефекта через зону контроля радиоволнового дефектоскопа позволяет снизить порог его чувствительности.

Резонансный метод радиоволнового контроля основан на введении ОК в резонатор, волновод или длинную линию и регистрации изменений параметров электромагнитной системы (резонансной частоты, добротности, числа возбуждаемых типов колебаний и т. д.). Этим методом контролируются размеры, электромагнитные свойства, деформации и другие параметры ОК. Успешно используется разонансный метод для контроля уровня жидкостей в резервуарах и параметров движения различных объектов.

Радиоволновые средства НК — это датчики с чувствительным элементом, в котором контролируемая величина преобразуется в информативный параметр; генераторы СВЧ — источники электромагнитных колебаний; вторичные преобразователи предназначены для формирования сигналов регистрации и управления [7].

Контрольные вопросы

2.1.1. Укажите критерий разделения материалов на диэлектрики, проводники и несовершенные диэлектрики.

2.1.2. Чем различаются амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый методы контроля?

2.1.3. Можно ли радиоволновыми методами контролировать структурное состояние стальных деталей?

2.1.4. Возможен ли радиоволновой контроль влажности зерна?

2.1.5. К какому классу веществ с точки зрения радиоволнового контроля в 3-см диапазоне волн относятся: окись алюминия, асбест, лавсан, антрацит, линолеум, древесина дуба, цемент?

Указание: воспользуйтесь табл. 1, с. 207 из [1].

§ 2.2. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ РАДИОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ

Колебания СВЧ могут быть получены с помощью генераторов магнетронного типа, ламп обратной волны, отражательных клистронов, квантово-механических генераторов и полупроводниковых приборов. Наибольшее применение находят клистроны, затем следуют магнетроны, лампы обратной волны и полупроводниковые генераторы.

Отражательные клистроны широко применяют в качестве задающих генераторов в радиолокационных станциях, в усилительных цепочках маломощных передатчиков, в радиорелейных линиях связи, маломощных генераторах СВЧ непрерывного или импульсного излучения в передающих устройствах малого радиуса действия (радиодальномеры, радиомаяки, ответчики), а также как маломощные генераторы в измерительной и малогабаритной аппаратуре благодаря ряду преимуществ перед другими маломощными генераторами СВЧ. Это, в частности, низкий уровень флюктуационных шумов, простота эксплуатации и высокая надежность при изменении в широких пределах условий эксплуатации. Выпускаемые отражательные клистроны малой мощности (до 100 мВт) перекрывают широкий диапазон длин волн, вплоть до субмиллиметровых. Некоторые типы клистронов требуют принудительного воздушного охлаждния, особенно предназначенные для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона, когда принципиально трудно повысить их кпд. К сожалению, тепловые уходы частоты преобладают над всеми другими и присущи любому типу генераторов СВЧ.

Магнетронные генераторы охватывают широкий диапазон частот и обеспечивают большой диапазон мощностей в импульсе: от единиц ватт до десятков мегаватт. Они находят широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре в качестве задающих генераторов, источников мощности СВЧ и т. д. Однако в последнее время намечается отказ от их широкого использования вследствие большой нестабильности генерируемой частоты и тепловых уходов частоты. Кроме того, наличие постоянных магнитов увеличивает массу магнетронов, для питания требуются высокое напряжение и интенсивное охлаждение (путем обдува) резонатора.

Лампы обратной волны (ЛОВ) относятся к классу широкодиапазонных генераторов колебаний СВЧ с электронной перестройкой частоты. Выпускается большое число типов ЛОВ, перекрывающих диапазон волн от 60 см до десятых долей миллиметра. Для фокусировки электронного луча в ЛОВ в основном применяют постоянные магниты трубчатой формы. Такие ЛОВ выпускаются в виде пакетированной конструкции, в которой объединены корпус ЛОВ, постоянный магнит и юстирующее приспособление. Поэтому нормальная работа ЛОВ может быть нарушена при наличии внешних магнитных полей или расположенных поблизости от ЛОВ ферромагнитных материалов. Как правило, расстояние между ЛОВ и подобными материалами должно быть не менее 400 мм. Режим работы ЛОВ сильно зависит от внешних условий (температуры, влажности), а также согласования с нагрузкой.

Лампы обратной волны особенно критичны к изменению температуры среды. При воздействии на ЛОВ механических ударов и вибраций происходят периодические изменения расстояния между отдельными электродами электронной пушки либо их поперечные смещения относительно друг друга, что сопровождается амплитудной и частотной модуляцией генерируемых колебаний. Девиация частоты ЛОВ при вибрациях обычно несколько больше, чем у клистронов. К недостаткам ламп данного типа относится также то, что ЛОВ, находившиеся на хранении и длительное время (более двух месяцев) не включающиеся, должны быть подвергнуты тренировке, которая занимает не менее 1,5 ч. Генераторы на основе ЛОВ, как и все генераторы СВЧ с широким диапазоном электронной перестройки частоты, не обладают высокой стабильностью частоты при работе в какой-либо точке диапазона.

Эффективный автогенератор сантиметровых и миллиметровых волн может быть создан на полупроводниковом эквиваленте отражательного клистрона — *лавинно-пролетном диоде* (ЛПД), который служит основой ряда устройств СВЧ (генераторов, усилителей, преобразователей частоты).

В основе работы ЛПД лежит эффект генерации когерентных колебаний при лавинном пробое полупроводниковых диодов СВЧ. Получаемая при этом мощность колебаний в непрерывном режиме составляет для различных диодов от десятков микроватт до нескольких милливатт при длине волны 0,8 ... 10 см. Генератор состоит из лавинно-пролетного диода и полого резонатора, связанного с полезной нагрузкой. Характерная особенность ЛПД — повышенный уровень шума на высоких ($>10^4$ ГГц) частотах. Даже в германиевых диффузионных ЛПД с однородным пробоем этот уровень на 25 ... 30 дБ превышает дробовой шум вакуумного диода с таким же током. В кремниевых ЛПД,

где пробой сопровождается микроплазменными явлениями, уровень шума может превышать на 60 ... 70 дБ дробовой шум.

Малогабаритные генераторы сантиметрового диапазона (3 ... 15 ГГц) обеспечивают в непрерывном режиме при токе питания 10 ... 20 мА и напряжении 20 ... 70 В выходную мощность от 5 до 50 мВт при кпд 3 ... 7%. Значительный уровень высших гармоник в спектре лавинного тока позволяет использовать ЛПД сантиметрового диапазона волн для создания генераторов миллиметрового диапазона. Резонатор такого генератора целесообразно делать двух- или трехконтурным, с тем чтобы один из контуров, не связанный с полезной нагрузкой, был настроен на основную частоту в коротковолновой части сантиметрового диапазона (10 ... 15 ГГц), а остальные — на высшие гармоники. Генераторы этого типа имеют в верхней части миллиметрового диапазона выходную мощность (в непрерывном режиме) порядка единиц милливатт. Однако спектральная плотность флюктуаций амплитуды и частоты ЛПД на 15 ... 20 дБ выше, чем у отражательных клистронов. Итак, СВЧ-устройства на ЛПД обладают такими преимуществами, как малые габариты, масса, экономичность питания и т. д. Основной их недостаток — высокий уровень шумов.

Таблица 2.2

Тип генератора	Режим работы	Диапазон * длин волн, мм	Мощность ** излучения, Вт	Кпд **, %
Отражательный клистрон	Непрерывный	2 ... 100	0,1	2
Генераторный лавинно-пролетный диод (ГЛПД)	»	8 ... 100	0,05	3 ... 7
Генератор на диоде Ганна	»	8 ... 100	0,65	6
То же	Импульсный (10^{-7} с)	8 ... 100	200	14

* Диапазон перекрывается рядом приборов.
** Данные относятся к максимально достижимым значениям мощности и кпд.

Созданы и получили также практическое применение полупроводниковые генераторы СВЧ на *диодах Ганна*. Они работают при низких напряжениях питания (4 ... 8,5 В), потребляя при этом ток от 0,4 до 1,5 А.

Сравнительная характеристика некоторых типов генераторов СВЧ приведена в табл. 2.2.

Направляющие системы. В приборах, связанных с излучением радиоволн, энергия от генератора к антенне или от антенны к приемнику передается с помощью направляющих систем.

Электромагнитные волны направляются проводящими или изолирующими поверхностями, образующими каналы электромагнитной энергии в пространстве между ними. На рис. 2.2 схематически изображены основные типы направляющих систем. На практике в приборах НК чаще всего используют *прямоугольные волноводы*. В прямоугольном волноводе может распространяться большое число типов магнитных H_{mn} или электрических E_{mn} волн, причем преимущественное распространение волн того или иного типа зависит от размеров волновода, частоты и метода возбуждения. Индексы m и n характеризуют число стоячих полуволн, укладывающихся на широкой стороне a и узкой

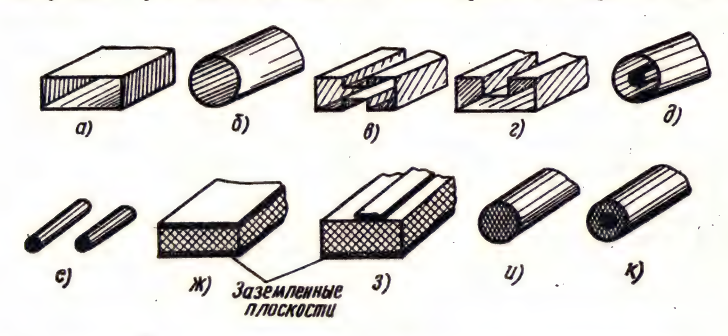


Рис. 2.2. Основные типы применяемых на практике направляющих систем:
а — прямоугольный волновод; *б* — круглый волновод; *в, г* — волноводы сложного профиля; *д* — коаксиальный волновод; *е* — двухпроводная линия; *ж, з* — полосковые линии; *и, к* — диэлектрические волноводы

стороне b поперечного сечения волновода соответственно. Например, для волны H_{10} $m=1$ и $n=0$; на стороне волновода a укладывается одна стоячая полуволна, на стороне b поле однородно. Это отмечается индексом «0» при указании типа волны. Вдоль оси волновода поле распределено по закону бегущей волны.

При передаче энергии по волноводу обычно стремятся к тому, чтобы волновод работал на волне одного типа. Практически это достигается соответствующим выбором размеров волновода в соответствии с условиями: $a<\lambda<2a$; $\lambda>2b$. Волна H_{10} обладает наименьшей критической частотой, при ее распространении по волноводу отсутствуют другие типы волн, поэтому она называется волной основного типа для прямоугольного волновода.

Критическая длина волны H_{10} в волноводе равна $\lambda_{кр}=2a$, при этом длина волны в волноводе $\lambda_в$ отличается от длины волны λ в свободном пространстве:

$$\lambda_в=\frac{\lambda}{\sqrt{1-(\lambda/\lambda_{кр})^2}}.$$

По волноводу волна может распространяться в двух направлениях: от генератора к нагрузке и от нагрузки к генератору; первую волну называют падающей или прямой, вторую — отраженной или обратной. Если нагрузка полностью потребляет переносимую падающей волной энергию, говорят, что она согласована с волноводом. Если нагрузка потребляет переносимую падающей волной энергию лишь частично (вследствие чего появляется отраженная волна), говорят, что нагрузка не полностью согласована с волноводом. Режим работы волновода определяется интерференцией падающей и отраженной волн (в данном случае одного основного типа колебаний). При этом поле в волноводе можно рассматривать как результат наложения полей двух волн: бегущей волны, участвующей в передаче энергии от генератора к нагрузке, и стоячей волны, не участвующей в передаче энергии.

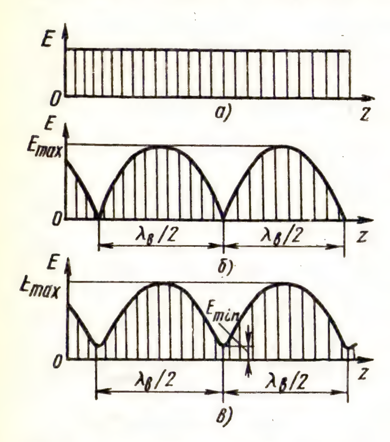


Рис. 2.3. Распределение амплитуд напряженности электрического поля вдоль оси волновода:

а — в режиме бегущей волны; *б* — в режиме стоячей волны; *в* — в смешанном режиме

На рис. 2.3 показано распределение амплитуд напряженности электрического поля вдоль оси волновода для основного типа волн. Распределение электрического поля может быть экспериментально измерено с помощью волноводной измерительной линии, представляющей участок с перемещающимся по продольной щели в широкой стенке волновода приемным штырем.

Анализ режима работы волновода имеет существенное значение при согласовании его с нагрузкой. Сущность согласования заключается в том, что в волновод вносится дополнительная неоднородность, которая создает отраженную волну, компенсирующую волну, отраженную от нагрузки.

В заключение отметим, что прямоугольные волноводы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами волноводов. Поэтому они получили наибольшее распространение. В частности, в прямоугольных волноводах деформации стенок меньше влияют на структуру поля, чем в круглых. Применяют прямоугольные волноводы главным образом на сантиметровых и миллиметровых волнах.

Диэлектрические волноводы (см. рис. 2.2, *и, к*) находят все более широкое применение. Если размеры сечения волновода примерно равны длине волны или несколько меньше ее, значительная доля энергии распространяющейся вдоль него волны

сосредоточена в диэлектрике, а скорость ее распространения меньше скорости света (случай замедления). При этом волновод может подвергаться изгибам с радиусом 10 ... 20 λ без появления заметного излучения. Технология изготовления диэлектрических волноводов проще, чем металлических полых. Сочленение диэлектрического и металлического полого волноводов чрезвычайно простое: достаточно конец диэлектрического волновода вставить в металлический.

Полосковые волноводы, несмотря на значительную перспективу, еще редко используются в приборах неразрушающего контроля, в основном из-за сложной дорогой технологии, отсутствия простых регулировочных элементов в полосковом исполнении, сложной методики проверки параметров.

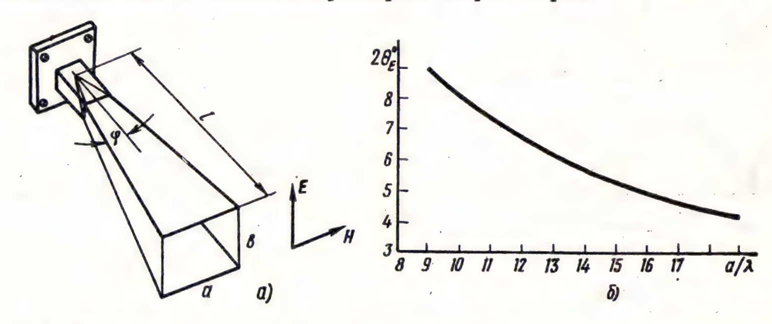


Рис. 2.4. Рупорная антенна (*а*) и зависимость ее ширины диаграммы направленности от размеров (*б*)

Передающие и приемные антенны. Для излучения и приема радиоволн используют *антенны* (от лат. antenna — мачта, рей). Антенны диапазона СВЧ характеризуют апертурой — раскрывом (выраженным обычно через длину волны излучения), а также диаграммой направленности, кпд и другими параметрами.

Передающие антенны стремятся делать остронаправленными, чтобы получить высокую локальность контроля объектов. Приемные антенны должны обеспечивать наилучшие условия приема энергии радиоволн СВЧ, приходящих от ОК. Как передающие, так и приемные антенны по возможности должны быть согласованы с внешним пространством и волноводным трактом, чем достигаются оптимальные условия передачи электромагнитной энергии от генератора к ОК и от ОК к приемнику. Во многих случаях один и тот же тип антенны может быть использован и для излучения, и для приема.

Рупорная антенна представляет комбинацию отрезка волновода постоянного сечения и собственно рупора (рис. 2.4). Частный случай рупорной антенны — *открытый конец волновода.*

Рупорные антенны формируют на выходе сферическую волну, распространяющуюся вдоль оси рупора. Излучение рупор-

ной антенны можно рассматривать как прохождение электромагнитных волн через отверстие в экране (раскрыв рупора) с учетом дифракции. Характеристики поля излучения рупорной антенны (диаграмма направленности, коэффициент усиления и др.) определяются размерами рупора: длиной l, размерами раскрыва a, b и углом φ. Все эти параметры взаимозависимы, и изменение одного из них ведет к изменению других. Учет этой зависимости необходим при расчете рупоров, диаграмма направленности которых соответствует расчетной. Диаграмма направленности рупорной антенны имеет вид сигарообразного тела, это так называемые «игольчатые» диаграммы. Толщина «сигары» зависит от формы и размеров раскрыва рупора, типа волны, длины рупора. Требуемая диаграмма направленности обеспечивается, если в раскрыве (на выходе антенны) создается плоская волна, для чего необходима большая длина рупора (при этом сферическая волна в раскрыве мало отличается от плоской), т. е. необходимо выполнение условия: $l \geqslant (ab)/(2\lambda)$, где λ — длина волны. Для такой антенны лучшая направленность имеет место при постоянном амплитудном распределении поля в раскрыве. Однако это условие выполнить трудно, так как в рупоре в основном сохраняется то же распределение амплитуд, что и в поперечном сечении волновода: постоянная амплитуда в плоскости E, а в плоскости H амплитуда распределена по закону косинуса с максимумом в середине широкой стенки.

На диаграмму направленности влияет дифракция на внешних краях антенны, ухудшая ее, поэтому для ослабления этого влияния раскрыв рупора следует увеличивать. Чем больше раскрыв, тем меньше расходится луч. При выполнении условия $l \geqslant (ab)/2\lambda$ выражение для диаграммы направленности рупорной антенны в двух главных плоскостях (H и E) для $\theta \leqslant 30°$ имеет вид:

$$F_E(\theta) \approx \frac{\sin\left(\pi \frac{b}{\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta}, \qquad F_H(\theta) \approx \frac{\cos\left(\pi \frac{a}{\lambda} \sin\theta\right)}{1 - 2\frac{a}{\lambda \sin\theta}},$$

где θ — угол между направленим наблюдения и оптической осью излучения энергии.

При оптимальных размерах рупора максимален коэффициент усиления G:

$$b = 0{,}8a; \quad l = 0{,}3a^2/\lambda; \quad G = 6ab/\lambda^2.$$

На рис. 2.4, *б* представлена расчетная зависимость ширины диаграммы направленности рупорной антенны для указанных параметров: $2\theta_E \approx (53\lambda/a)°$. При помощи рупорной антенны нельзя получить сечение луча меньше размеров раскрыва рупора,

поэтому с учетом влияния ближней зоны сечение луча на расстоянии L от края рупора определяют из соотношения

$$\delta_{01}=ab+\theta_{0,1}(L-L_0),$$

где $\theta_{0,1}$ — ширина диаграммы направленности на уровне 0,1 P_{max}; L_0 — протяженность ближней зоны $(L>L_0)$.

Диэлектрические антенны представляют сплошные стержни или трубки круглого сечения либо прямоугольного сечения из диэлектрика длиной в несколько длин волн λ с поперечным сечением, соизмеримым с λ. Они относятся к классу *антенн бегущей волны*. Благодаря тому, что в стержнях устанавливается бегущая волна, диэлектрические антенны имеют осевое (продольное) излучение. Антенна состоит из диэлектрического стержня и металлического волновода, в который вставляется один из концов стержня (рис. 2.5).

Излучение диэлектрической антенны зависит от длины, поперечных размеров стержня и свойств диэлектрика. На форму диаграммы направленности такой антенны большое влияние оказывает тип волны. Симметричные волны не дают излучения вдоль оси стержня. Концентрирование энергии вдоль оси возможно, если излучение отдельных элементов стержня совпадает с осью. Это в свою очередь выполнимо, если преобладает поперечная составляющая токов смещения в стержне. Наиболее благоприятны волны H_{11} (для круглого сечения) и H_{10} (для прямоугольного).

В диэлектрическом стержне электромагнитная волна распространяется со скоростью $v=c/\sqrt{\varepsilon_r}$, где c — скорость света; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала стержня. При уменьшении площади сечения стержня скорость распространения приближается к скорости света.

Максимальное излучение антенны направлено вдоль оси стержня, если размер и материал стержня подобраны так, что скорость распространения волны вдоль стержня приближается к скорости света. Для удовлетворения этим требованиям площадь S сечения стержня должна быть в пределах

$$\frac{\lambda_0^2}{10(\varepsilon_r-1)}\leqslant S\leqslant\frac{\lambda_0^2}{4(\varepsilon_r-1)}. \qquad (2.2)$$

Нарушение этого условия ведет к росту бокового излучения (боковых лепестков) — при увеличении сечения или к расширению главного лепестка диаграммы направленности — при уменьшении сечения.

Соотношение (2.2) можно записать через поперечные размеры стержня

$$\frac{\lambda}{\sqrt{2{,}5\pi(\varepsilon_r-1)}}\leqslant d\leqslant\frac{\lambda}{\sqrt{\pi(\varepsilon_r-1)}}.$$

При расчете диэлектрических антенн важным параметром является *коэффициент замедления* $K = v/c$, значения которого определяются графиками рис. 2.5, *б*.

При заданных значениях λ и K оптимальная длина стержня $l_{opt} = \lambda K/(2\sqrt{1-K})$. Практически длина стержня влияет на ширину диаграммы направленности до значений $l \approx (6 \dots 8)\lambda$. При бо́льших l основной лепесток диаграммы направленности изменяется мало, но начинают возрастать боковые лепестки. Для лучшего согласования антенны со свободным пространством стержень обычно делают конусообразным, чтобы скорость волны v на конце стержня приближалась к скорости света c.

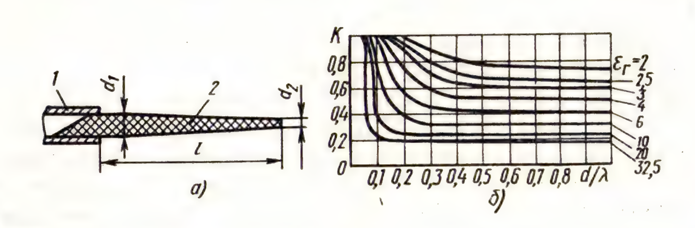


Рис. 2.5. Диэлектрическая антенна (*а*) и графики для определения коэффициента замедления (*б*):

1 — металлический волновод; *2* — диэлектрический стержень

Исследования показывают, что с помощью диэлектрических антенн можно получить удовлетворительные диаграммы направленности с шириной луча не менее 20 ... 22°. При этом имеет место значительный выигрыш в размерах по сравнению с рупорными антеннами.

Фокусирующие антенны (эллиптические, линзовые, гиперболические и др.) [11] используют в приборах НК значительно реже, поскольку они сложны в изготовлении, имеют значительные габариты и массу, нуждаются в первичном облучателе, как правило рупоре. Однако фокусирующие линзы нередко используют для компенсации дифракции простых рупорных антенн.

Развязывающие элементы. Для развязки различных участков волноводного тракта между собой и прежде всего для развязки генератора СВЧ с нагрузкой применяют различные развязывающие устройства: вентили, циркуляторы, аттенюаторы и т. п.

Основные характеристики *вентиля* — устройства для передачи энергии СВЧ только в одном направлении: полоса рабочих частот, вносимые потери в прямом направлении, затухание в обратном направлении, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) на входе в полосе рабочих частот, температурная зависимость параметров, а также габариты и масса. Качество

развязки вентиля можно характеризовать *вентильным отношением (добротностью)* — отношением мощности затухания обратной волны к мощности потерь прямой.

Для создания вентилей используют ферритовые пластины, помещенные в волноводе. Наиболее широко применяется *резонансный вентиль* на прямоугольном волноводе. Он представляет отрезок волновода, в котором тонкая поперечно-намагниченная ферритовая пластина расположена в плоскости, перпендикулярной широким стенкам волновода и, как правило, соприкасается с металлической стенкой волновода, что улучшает рассеяние энергии, поглощаемой ферритом. В резонансных вентилях используется явление необратимого резонансного поглощения в феррите [11]. Резонансные вентили на прямоугольном волноводе обладают широкой полосой пропускания частот и позволяют рассеивать значительную энергию.

Вентиль на эффекте смещения поля — это обычно отрезок прямоугольного волновода, в котором находится толстая ферритовая пластина, покрытая с одной стороны поглощающим слоем. Снаружи волновода размещается постоянный магнит, создающий поперечное магнитное поле. В таком вентиле используются физические явления, вызывающие различия в структуре поля прямых и обратных волн. Напряженность электрического поля прямой волны в месте расположения пленки поглощающего слоя минимальна, поэтому поглощающий слой оказывает на нее слабое влияние, в то время как обратная волна интенсивно затухает в поглощающем слое. Магнитная система вентиля на смещении поля проще по конструкции, а габариты и масса ее меньше, чем у резонансного вентиля, поскольку в вентиле на смещении поля не требуется высокой напряженности магнитного поля.

Вентили на смещении поля наиболее пригодны для использования при малых уровнях передаваемой по волноводу мощности и в случаях, когда потери в прямом направлении должны быть очень малыми ($\sim$0,1 дБ).

Вентили, использующие эффект Фарадея [11], обычно позволяют получить в 3-см диапазоне вентильное отношение около 30 дБ и потери прямой волны меньше 0,5 дБ в полосе около 10%. Вектор электрического поля прямой волны (плечо *1* на рис. 2.6) перпендикулярен поглощающим пластинам, а вектор обратной (отраженной) волны параллелен им, поэтому волна интенсивно поглощается пластиной *а*. Другая поглощающая пластина *б* служит для компенсации вторичных переотражений от плеча *2*.

В качестве развязывающих элементов применяют также *циркуляторы* — устройства в виде системы волноводных каналов и расположенных внутри них ферритовых элементов. Электромагнитные волны распространяются из одного канала в другой толь-

ко в определенной последовательности. На рис. 2.7 представлена схема Y-циркулятора, состоящая из трех соединенных между собой под углом 120° прямоугольных волноводов [11]. В центральной части расположен ферритовый цилиндр достаточно большого диаметра, снаружи — постоянный магнит.

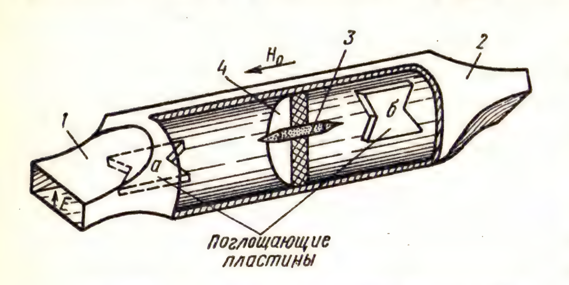


Рис. 2.6. Вентиль на эффекте Фарадея:
1 и *2* — входное и выходное плечи; *3* — ферритовый стержень; *4* — диэлектрический держатель

Принцип работы Y-циркуляторов основан на искажении картины высокочастотного поля в феррите, которое имеет ту же природу, что и в устройствах со смещением поля. Электрическое и магнитное поля образуют такую комбинацию, при которой вектор Пойнтинга существует во входном плече *1* и в выходном плече *2*, а в плече *3* он равен нулю. Таким образом, энергия, подведенная к плечу *1*, поступает в плечо *2* и не проходит в плечо *3*. В силу симметрии энергия из плеча *2* попадает в плечо *3* и не поступает в плечо *1*, т. е. Y-циркулятор пропускает волны в направлении *1→2→3→1*.

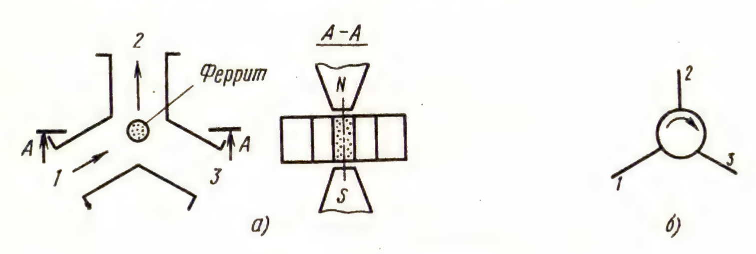


Рис. 2.7. Y-циркулятор:
а — устройство; *б* — схема передачи энергии

Простота конструкции, малые размеры и масса, перекрытие диапазона СВЧ вплоть до миллиметровых волн обеспечили широкое практическое применение Y-циркуляторов. В настоящее время разработаны Y-циркуляторы для различных диапазонов длин волн с развязкой не менее 20 дБ в полосе 10 ... 20% для рабочих температур от —60 до +60°С при КСВН не более 1,2. Они могут быть использованы вместо обычных ферритовых резонансных вентилей, для чего плечо *3* нагружается на согласованную нагрузку с $k_{\text{ст}\,U} \approx 1{,}01$.

Иногда в качестве развязывающих элементов используют *ат-*

тенюаторы — отрезки волноводов с перемещающейся поперек широкой стенки поглощающей пластиной. Недостаток аттенюаторов заключается в том, что происходит потеря энергии прямой волны. Для уменьшения переотражений концы поглощающей пластины делают заостренными.

Фазовращатели широко используют в измерительных схемах, для фазовой автоподстройки, фазовой компенсации, установки фазы и т. д. В классических конструкциях в волновод вводят диэлектрическую пластину из высококачественного диэлектрика, что приводит к изменению фазовой постоянной волны на регулируемом участке волновода. Перемещать пластину можно вручную или с помощью электромеханического привода через профилированный кулачковый механизм. Чем больше ε_r материала пластины, тем больше фазовый сдвиг проходящей волны. Обычно максимальный фазовый сдвиг в регулируемых фазовращателях достигает 180 ... 360°.

Другой распространенный тип фазовращателя — *сжимная линия*, представляющая прямоугольный волновод со щелью, прорезанной посредине широкой стенки с обеих его сторон. При сжатии волновода происходит изменение длины волны $\lambda_{кр}=2a$ и как следствие — изменение длины волны $\lambda_в$.

Нередко для фазового сдвига волны применяют *Y-циркуляторы с регулируемым короткозамкнутым поршнем.* Поршень при этом подключают к плечу *2* циркулятора (рис. 2.7), и фаза волны, проходящей из плеча *1* в плечо *3*, меняется на величину $\Delta\varphi=2\frac{2\pi}{\lambda_в}\Delta l_{кз}$, где $\Delta l_{кз}$ — изменение положения поршня.

При необходимости увеличения скорости изменения фазы (случай фазовой модуляции) применяют электрически управляемые фазовращатели на ферритовых или полупроводниковых элементах.

Элементы волноводной техники. Отрезки волноводного тракта или волноводные секции соединяют с помощью плоских контактных или дроссельных фланцев.

Плоские контактные фланцы применяют в тех узлах тракта, которые не подвергаются частой разборке. Для получения хорошего КСВН (около 1,002) необходимо соблюдать высокую точность обработки контактных поверхностей фланцев. Между фланцами двух секций иногда размещают контактную прокладку, изготовленную из бронзы, меди или алюминия. Контакт достигается с помощью пружинных лепестков, расположенных по внутреннему периметру пластины.

Дроссельные фланцы используют в местах, где возможны небольшие взаимные смещения секций или часто осуществляется разборка узла. Большинство дроссельных соединений основано на применении короткозамкнутой полуволновой передающей линии: короткое замыкание, трансформированное в плоскость соч-

ленения, поддерживает непрерывность электрического контакта в соединении, несмотря на наличие там конструктивного зазора.

При конструировании волноводных трактов часто возникает необходимость *в изгибах и скрутках* волноводов, в различных *уголках.* Резкие изгибы тракта вызывают большие отражения, поэтому обычно используют плавные изгибы. Оптимальные их характеристики получаются в том случае, когда длина изгиба составляет целое число длин полуволн в волноводе. Полоса пропускания частот составляет при этом около 10%, а КСВН менее 1,05.

Прямоугольные изгибы выполняют, как правило, в Е- и Н-плоскостях (одноуголковые соединения). Более широкополосны уголки с двойным поворотом на 45° (двухуголковые соединения). В этом случае отражения, возникающие от одного поворота, компенсируются отражениями от другого. КСВН для этих соединений не превышает 1,05.

С помощью *волноводной скрутки* можно изменить плоскость поляризации, т. е. направление вектора напряженности электрического поля в волноводе. При этом наилучшее согласование получается при длине скрутки, равной нескольким длинам полуволны в волноводе. Полоса пропускания скрученного участка волновода около $\pm 6\%$ от номинальной частоты, КСВН не превышает 1,1.

Для соединения волноводов различных размеров и типов часто приходится применять специальные переходы: плавный, ступенчатый, переходы от прямоугольного волновода к круглому, от коаксиальной линии к прямоугольному волноводу и т. д. При этом возникает задача обеспечения структуры поля и типа волн, оптимальных для каждой из соединяемых линий передачи. Это достигается применением специальных фильтров и трансформаторов типов волн.

Плавный *переход прямоугольного волновода* представляет неоднородную линию с непрерывно изменяющимися погонными параметрами, предназначенную для согласования двух однородных линий с различными волновыми сопротивлениями. Длина переходной секции волновода выбирается не меньше двух длин волн в волноводе. При этом волновое сопротивление перехода изменяется достаточно медленно, и отраженная волна практически не возникает.

Получили распространение плавные переходы от прямоугольного волновода к круглому. Длина переходного участка выбирается также не меньше двух длин волн в прямоугольном волноводе. Волна основного типа прямоугольного волновода H_{10} переходит в волну основного типа в круглом волноводе H_{11}, поскольку структуры их электрического и магнитного полей подобны.

На рис. 2.8 показан вариант перехода от коаксиальной линии к прямоугольному волноводу при возбуждении в нем волны основного типа H_{10}. Изменяя положение короткозамыкающего поршня и смещая штырь коаксиальной линии относительно оси, можно получить хорошее согласование, т. е. добиться максимальной передачи энергии в нагрузку. Обычно расстояние от поршня до штыря равно нечетному числу четвертей длины волн в волноводе.

Ступенчатые переходы обычно применяют для соединения волноводов разных сечений одного и того же диапазона волн. Согласование их осуществляют с помощью четвертьволновых трансформаторов, клинообразных вставок и диафрагм.

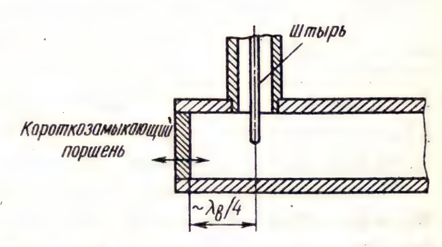


Рис. 2.8. Коаксиально-волноводный переход

Задача согласования направляющей системы с нагрузкой — установить в системе режим бегущей волны. Это достигается трансформацией сопротивления нагрузки или неоднородности в активное сопротивление, равное волновому сопротивлению используемой направляющей системы (линии передачи).

Практически согласованные линии осуществляют установкой между генератором и нагрузкой (неоднородностью), вызывающей отражение волны, искусственной *неоднородности* — согласующего устройства. При этом стремятся, чтобы амплитуда отраженной от согласующего устройства волны была равна, а фаза противоположна отраженной в линии волне, т. е. отражения от согласующего устройства и нагрузки должны взаимно уничтожаться. Тогда между генератором и согласующим устройством устанавливается режим бегущей волны, а между нагрузкой и согласующим устройством — режим смешанных волн. Поэтому согласующее устройство желательно ставить как можно ближе к нагрузке.

Для согласования волноводов и коаксиальных линий применяют плавные переходы, диафрагмы, реактивные штыри, четвертьволновые трансформаторы и реактивные волноводные шлейфы.

Волноводные диафрагмы (рис. 2.9) — это тонкие проводящие поперечные перегородки, частично перекрывающие сечение волновода. Использование диафрагм для согласования волновода основывается на возможности компенсации волны, отраженной от нагрузки, волной, отраженной от диафрагмы. В настоящее время параметры диафрагм находят расчетным путем.

Неоднородность в волноводе может быть представлена с помощью эквивалентной схемы (рис. 2.9). При этом коэффициент отражения для основной волны оказывается таким же, как коэффициент отражения в эквивалентной двухпроводной линии, в которую в соответствующем месте включена индуктивность или емкость.

Диафрагмы используют также в качестве элементов резонансных систем и фильтров.

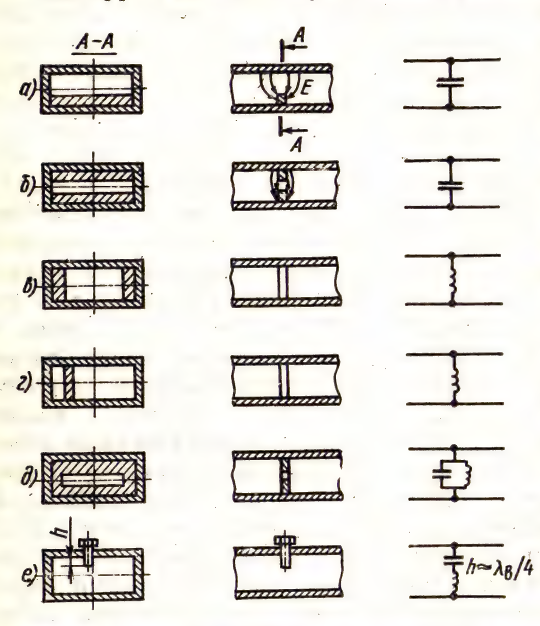


Рис. 2.9. Неоднородности в прямоугольном волноводе как элементы согласования

Диафрагмы концентрируют преимущественно либо электрическое поле (рис. 2.9, *а, б*) и поэтому вносят в линию шунтирующую емкость, либо магнитное поле (рис. 2.9, *в, г*) и вносят в линию шунтирующую индуктивность. Диафрагма рис. 2.9, *д* эквивалентна параллельному соединению индуктивности и емкости и соответствует включению в линию параллельного колебательного контура. При определенных соотношениях между размерами выреза и длиной волны этот контур настроен в резонанс с частотой генератора и не шунтирует волновод. Такую диафрагму называют резонансной.

Чаще всего для целей согласования используют *индуктивные диафрагмы*. *Емкостные диафрагмы* на практике применяются реже, так как при их включении снижается допустимая мощность, которая может передаваться по волноводу. *Резонансные диафрагмы* применяют в некоторых типах антенных переключателей, а также для создания полосовых волноводных фильтров.

Наряду с диафрагмами в качестве сосредоточенной реактивности часто используют так называемый реактивный штырь, выполняемый в виде винта (рис. 2.9, *е*). Характер реактивности зависит от глубины h погружения штыря. Если $h<\lambda_в/4$, сопротивление емкостное. Введение длинного штыря в волновод ($h>\lambda_в/4$) эквивалентно включению некоторой индуктивности в

линию. В случае штыря резонансной длины ($h=\lambda_в/4$) имеет место эквивалентное включение в линию последовательного резонансного контура. Реактивные штыри также находят широкое применение для согласования волноводных линий передач.

В конструкцию многих рассмотренных элементов волноводного тракта входят поглощающие нагрузки. *Маломощные поглощающие нагрузки* используют в таких устройствах, где требуется поглотить незначительную энергию (направленные ответвители, ослабители, маломощные циркуляторы). В качестве материала, обладающего большими поглощающими свойствами, часто применяют гетинаксовые пластины, покрытые с одной или с обеих сторон слоем графитовой или угольной суспензии.

В ряде устройств применяют объемные поглощающие нагрузки, способные рассеивать значительную энергию. Для лучшего отвода теплоты корпус таких нагрузок имеет ребристую конструкцию. Поглощающий материал по структуре подобен ферриту, однако обладает сильными поглощающими свойствами в диапазоне СВЧ. Это может быть металлокерамика, в состав которой входит порошковое железо или смесь песка с угольным порошком. Для уменьшения отражений торец поглощающей вставки делают скошенным, клинообразным или ступенькой, предназначенной для согласования вставки с волноводной линией. В последнем случае частично заполненный участок длиной $\lambda_в/4$ имеет волновое сопротивление, равное среднему геометрическому волновых сопротивлений участков волновода, заполненного и не заполненного поглощающей нагрузкой. Этот участок выполняет роль согласующего трансформатора. Согласованный волновод обладает большими преимуществами перед несогласованным: устойчивостью режима при изменении частоты генератора, возможностью передачи большей мощности без опасности электрического пробоя и др.

В практике часто встречаются *ответвления* волноводов: Т-образные соединения из прямоугольных волноводов, двойные волноводные тройники, кольцевые волноводные мосты.

На рис. 2.10 показаны два вида волноводных ответвлений для волны H_{10} в прямоугольном волноводе: *Т-образное типа Е* и *Т-образное типа Н*. Для волны основного типа Е- и Н-ответвления можно сравнить соответственно с последовательным и параллельным ответвлением длинной линии. Волна может возбуждаться в одном из плеч главного волновода и ответвляться в боковой волновод или, наоборот, возбуждаться в ответвлении и направляться в плечи главного волновода. Предположим, что волна H_{10} возбуждается в ответвленном волноводе и распространяется к Т-образному соединению. В обоих плечах главного волновода волны, равноудаленные от оси симметрии соединения, находятся в противофазе для Е-образного тройника и в фазе для Н-тройника. Такое распределение поля не изменится,

если волна будет возбуждаться в одном из плеч главного волновода. Если в ответвляющееся плечо тройника поместить короткозамыкающий поршень, то это плечо приобретет свойства реактивного волноводного шлейфа.

Т-образные соединения прямоугольных волноводов для волны H_{10} обладают следующими свойствами:

всегда можно выбрать такое положение плоскости короткого замыкания в одном плече, при котором связи между двумя другими плечами не будет;

если тройник симметричен, то можно выбрать положение плоскости короткого замыкания таким образом, что волны между двумя другими плечами проходят без отражения;

Т-образные соединения полностью согласовать невозможно.

Связь между волноводами может осуществляться не только с помощью всего поперечного сечения волновода, но и через щель, симметричную относительно боковых стенок. При этом необходимо иметь в виду, что щель возбуждается только поперечными, пересекающими ее токами. Щели, расположенные параллельно этим токам, не возбуждаются и непригодны для связи двух волноводов. На свойствах Т-образных соединений основана работа *двойных волноводных тройников*.

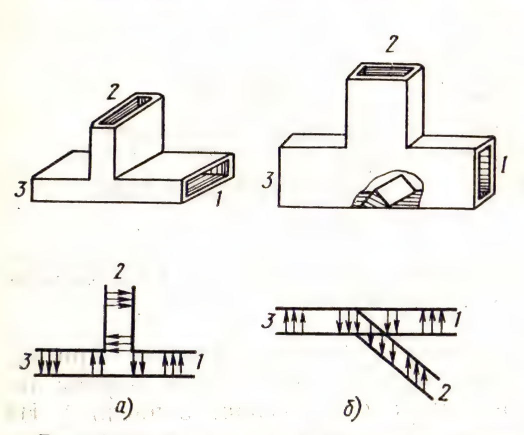


Рис. 2.10. Волноводные Т-образные ответвления Е- (*а*) и Н-типа (*б*):

1, 3 — главный волновод; *2* — боковое ответвление

Двойной тройник образован двумя ответвлениями от прямоугольного волновода (рис. 2.11). Поскольку двойной тройник выполняет роль волноводного моста, он получил весьма широкое распространение в волноводной технике (антенных переключателях, смесителях балансного типа, циркуляторах).

Чтобы проиллюстрировать свойства двойного тройника как волноводного моста, рассмотрим случай, когда энергия СВЧ поступает в плечо *1*. Если боковые плечи *3* и *4* симметрично нагружены, то энергия из плеча *1* поровну делится между плечами *3* и *4* и не поступает в плечо *2*, так как при симметрии полей в боковых плечах в плече *2* могут возбудиться только волны типа Е, начиная с волны E_{11}. Однако при размерах волновода, определяемых волной H_{10}, волны типа Е создают лишь местное

поле в области разветвления и далее по волноводу *2* не распространяются (рис. 2.11, *б*). На основании свойства обратимости можно утверждать, что если из боковых плеч приходят две волны типа H_{10} с равными амплитудами и фазами, то они склады-

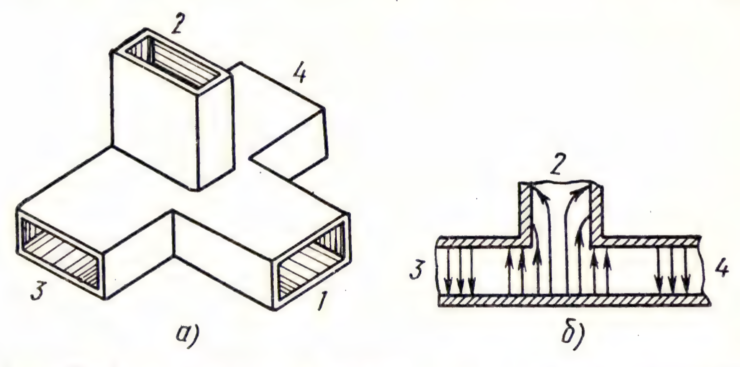


Рис. 2.11. Двойной волноводный тройник (*а*) и структура электрического поля в нем (*б*)

ваются в плече *1* и взаимно компенсируются в плече *2*. При питании из плеча *2* и симметрии нагрузок плеч *3* и *4* энергия делится между боковыми плечами и не поступает в плечо *1*. Из изложенного следует, что плечи Е и Н двойного тройника взаимно развязаны, т. е. энергия волны H_{10} не может переходить из плеча Е в плечо Н и наоборот.

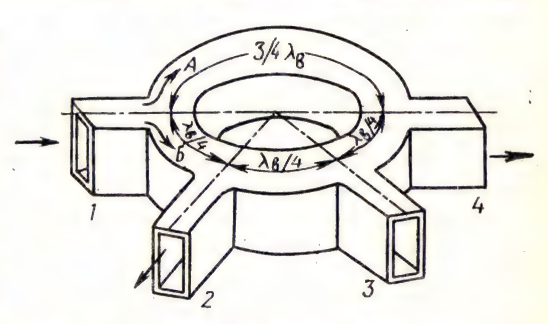


Рис. 2.12. Кольцевой волноводный мост

Двойной тройник обладает еще рядом полезных свойств, используемых в волноводной технике. Например, если в обоих плечах главного волновода распространяются волны с равными амплитудами и к Т-соединению они приходят в противофазе, то амплитуда волны в ответвленном волноводе равна удвоенной амплитуде волны в главном волноводе для Е-тройника (плеча Е) и нулю для Н-тройника (плеча Н). Если же волны приходят к Т-соединению в фазе, то в ответвленном волноводе амплитуда волны равна нулю для плеча Е и удвоенному значению для плеча Н.

На рис. 2.12 представлена схема кольцевого волноводного моста, изогнутого в плоскости узкой стенки волновода. Вдоль

кольца укладывается $0{,}5(3+4k)$ длин волн в волноводе на средней частоте рабочего диапазона, где $k=0, 1, 2, 3, \ldots$ К кольцу через промежутки $0{,}25(1+2k)\lambda_в$ подключено последовательно четыре волновода. Такое волноводное кольцо обладает свойствами волноводного моста.

Если генератор присоединен к плечу *1*, а все остальные плечи нагружены на согласованные нагрузки, то волна разветвляется в сторону плеч *2* и *4* с противоположными фазами. От плеча *1* до плеча *4* обе волны (*А* и *Б*) пройдут путь $3\lambda_в/4$. Так как их пути равны, волны придут к плечу *4* также с противоположными фазами, а поэтому волна пройдет в плечо *4*.

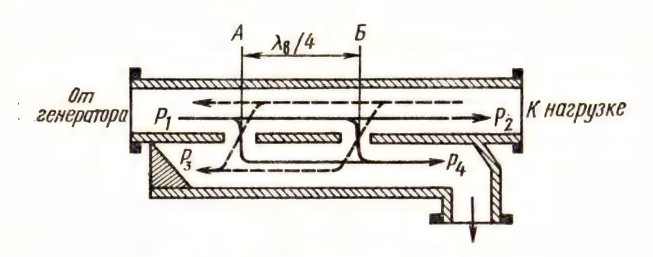


Рис. 2.13. Направленный ответвитель

Путь до плеча *3* для волны *А* на $\lambda_в/4$ больше, чем для волны *Б*, поэтому волны к плечу *3* придут с одинаковыми фазами и волна в плечо *3* проходить не будет. В плечо *2* волна проходит. При включении источника в плечо *3* энергия поступит также только в плечи *2* и *4*.

Существует несколько типов *направленных ответвителей*, широко используемых для отвода части энергии из основного волноводного тракта, измерения проходящей мощности, частоты и для других целей.

На рис. 2.13 показан направленный ответвитель с двумя отверстиями связи. Ответвитель состоит из двух волноводов, соединенных по узкой или широкой стенке. Отверстия связи расположены на расстоянии $\lambda_в/4$ друг от друга. Часть энергии волны, распространяющейся от генератора к нагрузке (антенне) в основном волноводе, через отверстия *А* и *Б*, являющиеся ненаправленными возбудителями, проникает в волновод ответвителя и распространяется вправо и влево от отверстий. В сечении *Б* ответвленные волны, распространяющиеся вправо, находятся в фазе, так как проходят одинаковое расстояние. Они складываются и направляются к выходу ответвителя. Волны, распространяющиеся влево, проходят различные пути: путь волны от отверстия *Б* больше на полволны, чем от отверстия *А*. В результате эти волны складываются в противофазе и взаимно компенсируются.

Если в основном волноводе возникнет отраженная волна $P_{отр}$, то, рассуждая аналогично, можно показать, что ответвляющаяся от нее часть энергии направляется только в сторону поглощающей нагрузки и не поступает на выход ответвителя. Таким образом, если по основному волноводу распространяются падающая и отраженная волны, то на выходе ответвителя, соединенного с измерительным устройством, выделится только часть энергии падающей волны.

Направленный ответвитель характеризуется коэффициентом связи $C=10\lg(P_4/P_1)$ и направленностью $D=10\lg(P_4/P_3)$. При создании направленных ответвителей стремятся получить высокую направленность и небольшое отражение на входе в определенном частотном диапазоне.

В практике встречаются *направленные ответвители с одним отверстием связи.*

Рис. 2.14. Турникетное волноводное соединение

Интересен и важен для практики ответвитель — турникетное волноводное соединение (рис. 2.14). Если мощность от генератора СВЧ поступает в плечо *1*, то она распределяется только в трех других плечах, так что

$$P_1=\frac{1}{2}P_5+\frac{1}{4}P_3+\frac{1}{4}P_4;\quad P_2=0.$$

При подключении генератора к плечу *3*

$$P_3=\frac{1}{2}P_5+\frac{1}{4}P_1+\frac{1}{4}P_2;\quad P_4=0.$$

Если при этом плечи *3* и *4* закоротить соответственно на длине $5\lambda_в/8$ и $7\lambda_в/8$ и линейно поляризованную волну генератора СВЧ направить в плечо *1*, то на выходе турникетного соединения (цилиндрическое плечо *5*) будет излучаться волна с правой круговой поляризацией. Если генератор подключить к плечу *2*, то будет излучаться волна с левой круговой поляризацией. И наоборот, для приема волны с правой круговой поляризацией приемное устройство подключается к плечу *1*, а с левой поляризацией — к плечу *2*.

На этом принципе построен турникетный анализатор поляризации: при приеме и исследовании эллиптически поляризованной (отраженной) волны два согласованных детектора помещаются в плечи *1* и *2*, которые и зафиксируют две составляющие эллиптической волны: E_A и E_B.

Приемники радиоволн СВЧ. В приборах СВЧ для неразрушающего контроля и при всех экспериментальных работах в

диапазоне СВЧ необходимо прежде всего установить наличие сигнала, измерить, усилить и обработать его. Известны многочисленные методы обнаружения сигналов СВЧ [11], однако практически наиболее распространены выпрямляющие устройства и термоэлектрические преобразователи.

Термоэлектрические преобразователи (термопары, терморезисторы, болометры и т. д.) широко используют для измерения тепловых величин. Их применение в технике СВЧ основано на тепловом действии энергии радиоволн СВЧ. Специфический вид термоэлектрического детектора — *болометр*, представляющий собой проводниковый или полупроводниковый резистор, который нагревается под воздействием излучения и вследствие этого изменяет свое сопротивление. Это изменение сопротивления может быть легко обнаружено с помощью соответствующих (например, мостовых) схем. Обычно через цепь, в которую включен болометр, пропускается постоянный ток — ток смещения. До тех пор, пока мощность сигнала меньше мощности, создаваемой током смещения, напряжение на выходе схемы прямо пропорционально мощности сигнала. Такие болометры очень удобны при измерениях, когда нужна высокая точность, однако они обладают сравнительно низкой чувствительностью.

Термочувствительные полупроводниковые резисторы — *терморезисторы* предназначены для измерения мощности в диапазоне СВЧ. Они имеют вид маленькой бусинки из полупроводника диаметром около 0,4 мм, укрепленной между двумя тонкими проволочными выводами. Полупроводник образует сопротивление с очень большим отрицательным температурным коэффициентом. При использовании терморезисторов для измерений в устройствах СВЧ их сопротивление регулируется в широких пределах изменением постоянного тока смещения, т. е. сопротивление терморезистора можно легко отрегулировать до значения, равного волновому сопротивлению типовой передающей линии диапазона СВЧ. Из-за малых размеров терморезистора его реактивное сопротивление мало по сравнению с активным сопротивлением на высокой частоте, что позволяет легко конструировать широкополосные терморезисторные головки. Высокая чувствительность к изменениям мощности нагрева делает терморезисторы пригодными для измерения мощности в диапазоне нескольких милливатт, однако это обстоятельство в свою очередь усложняет температурную компенсацию, особенно в случаях измерения очень малых мощностей.

Преобразовать сигналы СВЧ в постоянный ток или токи низкой частоты, которые могут быть измерены обычными методами, позволяют *полупроводниковые диоды*. Они могут быть использованы как детекторы или как преобразователи. Современные кристаллические детекторы являются наиболее чувствительными и доступными детектирующими устройствами, поэтому они

широко применяются в измерительной аппаратуре. Детектор — это точечный диод, состоящий из тонкой вольфрамовой проволоки, образующей упругий контакт с полупроводниковым кристаллом. Если детектор используется в качестве преобразователя частоты, то на него совместно с сигналом СВЧ подается напряжение гетеродина и на выходе выделяется ток биений разностной частоты, амплитуда которого пропорциональна напряжению сигнала, если напряжение гетеродина во много раз превышает напряжение сигнала.

Когда кристаллический детектор используется в качестве детектора слабых сигналов, его выводы соединяются с прибором постоянного тока или входом усилителя (в зависимости от вида применяемой модуляции).

Важнейшие параметры кристаллического детектора — вольт-амперная характеристика и чувствительность. Если напряжение сигнала достаточно мало и не выходит за пределы начального (квадратичного) участка вольт-амперной характеристики, то выпрямленный ток пропорционален квадрату приложенного напряжения. Поэтому детектор слабых сигналов называют квадратичным детектором.

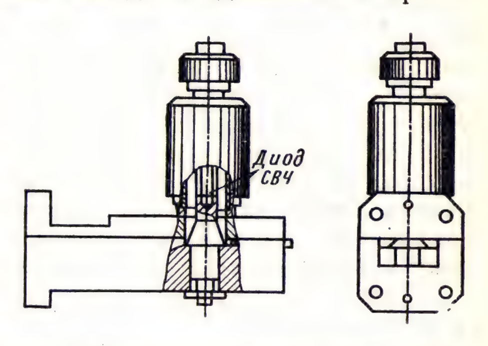


Рис. 2.15. Конструкция детекторной секции

Различают *чувствительность детектора* по току и по напряжению. Чувствительность по току/напряжению определяется как отношение выпрямленного тока/напряжения к поглощенной мощности высокой частоты. Типичная чувствительность по току составляет 0,1 ... 1,0 мкА/мкВт, по напряжению — 10 ... 300 мкВ/мкВт.

Детекторные диоды помещают в специальные конструкции — детекторные секции (головки). На рис. 2.15 приведена распространенная конструкция детекторной секции 8-мм диапазона. КСВН такой секции со стороны входа не превышает 1,2 в относительной полосе частот $\pm 10\%$.

Задачи

2.2.1. Рассчитать модуль коэффициента отражения $\rho_р$ от раскрыва рупора. Исходные данные: прямоугольный пирамидальный рупор; $a=32$ мм; $b=25$ мм; $l_{opt}=45$ мм; $\lambda_0=8$ мм; тип волны H_{10}.

Указания. Коэффициент отражения от раскрыва — комплексная величина; его модуль и аргумент зависят от размеров раскрыва. Строгое решение задачи для открытого конца волновода, зажатого между бесконечными плоскостями, проведенное Л. А. Вайнштейном, позволяет установить, что модуль

коэффициента отражения уменьшается с увеличением размеров раскрыва, а аргумент приближается к нулю.

Решение

Приближенно модуль коэффициента отражения от раскрыва рупора для основного типа волны H_{10} может быть определен из соотношения

$$\rho_p = \frac{1 - k_p/k_0}{1 + k_p k_0},$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ — волновое число в (свободном пространстве); $k_p = \frac{2\pi}{\lambda_в} = \frac{2\pi\sqrt{1-(\lambda_0/2a)^2}}{\lambda_0}$ — постоянная распространения в прямоугольном волноводе, поперечное сечение которого равно раскрыву рупора.

Коэффициент отражения по длине рупора от раскрыва к горловине изменяется по аргументу и модулю. При размерах раскрыва в несколько длин волн коэффициент отражения можно считать приблизительно равным нулю.

Ответ: $\rho_p \leqslant 5 \cdot 10^{-3}$.

2.2.2. Определить параметры волноводного направленного ответвителя с полной связью (рис. 2.13). Задано: $f_0 = 8800$ МГц; размеры волновода 10×23 мм, число отверстий 20. Использовать методику, изложенную в [12].

Ответ: диаметр отверстия связи 9 мм; расстояние между центрами отверстий 12,7 мм; общая длина ответвителя 248 мм; направленность не менее 20 дБ.

§ 2.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ

2.3.1. Контроль размеров

Радиоволновые методы используют для измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической либо диэлектрической основе, толщины диэлектрических слоев, металлических листов и проката. Для толщинометрии используют амплитудно-фазовый, фазовый, частотно-фазовый, геометрический, поляризационный и другие методы.

В амплитудно-фазовом методе используется функциональная связь между коэффициентом отражения от диэлектрического слоя и его толщиной. Как правило, реализуют относительное измерение модуля и аргумента коэффициента отражения с помощью высокочувствительных мостовых устройств. Условие однозначности результатов измерения толщины d (или ее изменения Δd) определяется соотношением

$$d\,(\Delta d) \leqslant \lambda_0/(4\sqrt{\varepsilon_r}),$$

где λ_0 — длина волны генератора; ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала слоя на длине волны λ_0.

Предельная относительная погрешность измерения толщины данным методом равна $\Delta n/n$, где $n = \sqrt{\varepsilon_r}$, т. е. она мала только

при контроле весьма однородных диэлектриков и практически составляет 1 ... 3%.

Амплитудно-фазовый метод реализован в ряде приборов (СТ-21И, СТ-31И, СТ-10И и др.). На рис. 2.16, *а* показана принципиальная электрическая схема преобразователя СВЧ прибора

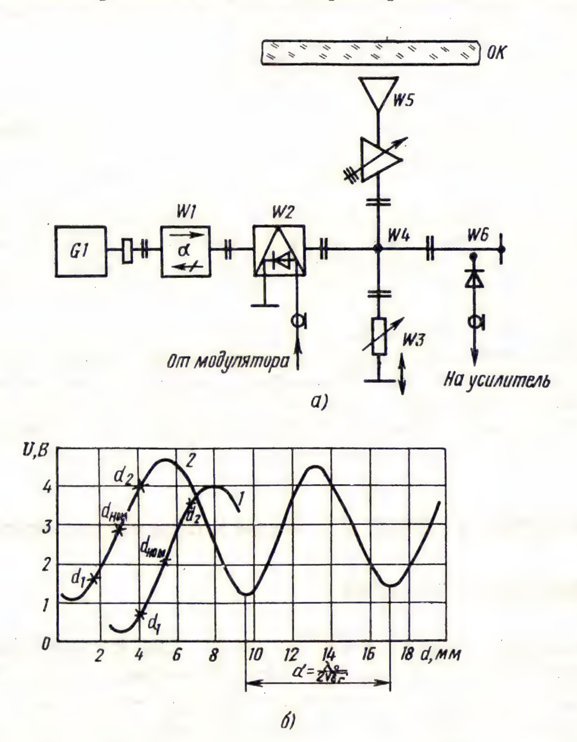


Рис. 2.16. Принципиальная схема СВЧ преобразователя прибора СТ-31И (*а*) и зависимость его выходного сигнала от толщины ОК (*б*):

G1 — генератор СВЧ; *W1* — вентиль; *W2* — электрически управляемый аттенюатор; *W3* — опорное плечо (регулируемый аттенюатор и короткозамыкающий поршень); *W4* — двойной волноводный тройник; *W5* — приемно-передающая (рупорная) антенна с согласующим трехштыревым трансформатором сопротивлений; *W6* — детекторная секция; $d_{ном}$ — номинальная толщина ОК в диапазоне толщин $d_1 ... d_2$; кривые *1* и *2* соответствуют различным зазорам между антенной и ОК

СТ-31И, на рис. 2.16, *б* — зависимость выходного сигнала прибора от толщины ОК. Прибор СТ-31И предназначен для контроля толщины стеклянной ленты в процессе производства при одностороннем доступе и выполнен на 3-см ГЛПД. Принцип действия прибора основан на сравнении в мостовой схеме (на

двойном волноводном тройнике) двух сигналов: опорного, создаваемого образцовым плечом моста, и измеряемого, пропорционального коэффициенту отражения от контролируемого диэлектрического слоя. Прибор состоит из радиоэлектронного блока, преобразователя СВЧ и цифрового индикатора.

Основные технические характеристики толщинометра СТ-31И

Диапазон контролируемых толщин (для технического стекла), мм	1,5 ... 7
Погрешность контроля, мм	±0,1
Рабочая частота, ГГц	8,3
Площадь контроля, мм²	25×25
Производительность контроля, м/ч	120
Масса, кг:	
радиоэлектронного блока	3
преобразователя СВЧ	2,8
цифрового индикатора	3,5

Для устранения неоднозначности результатов измерений, обусловленной видом градуировочной характеристики (рис. 2.16, *б*), при амплитудно-фазовом методе обычно применяют:

непрерывное измерение коэффициента отражения и счет числа максимумов (минимумов) результирующей интерференционной кривой;

две волны различной длины для грубого и точного определения толщины;

фазовую модуляцию сигнала с целью определения крутизны линейного участка интерференционной кривой для идентификации выбранного рабочего участка.

Прибор СТ-10И выполнен на 8-мм генераторе Ганна и предназначен для измерения толщины тонких диэлектрических покрытий на диэлектрической основе. На рис. 2.17 приведена схема преобразователя прибора. Излучающая и приемная антенны опираются на грани диэлектрической призмы *W4*, обращенной вершиной к ОК. Призма служит концентратором энергии, в результате

Рис. 2.17. Схема преобразователя прибора СТ-10И:

G1 — генератор; *W1* — вентиль; *W2* — электрически управляемый аттенюатор; *W3* и *W5* — соответственно передающая и приемная антенны; *W4* — диэлектрическая призма; *W6* — детекторная секция

улучшается локальность контроля. Диапазон измеряемых толщин 0,15...0,5 мм, основная погрешность ±0,02 мм, минимальное расстояние зоны контроля от края объекта не более 10 мм, масса преобразователя 0,5 кг.

Разновидностью амплитудно-фазового метода является *импедансный метод* СВЧ, применяемый в ряде приборов для контроля толщины и/или удельного сопротивления полупроводниковых эпитаксиальных и диффузионных слоев и структур [13]. Входное сопротивление структур измеряется через фазу и амплитуду стоячей волны, причем контроль производится как однопараметровым, так и двухпараметровым способом с погрешностью (при контроле толщины), не превышающей ±15% на длине волны 7,5 мм. Контролю подвергается обычно не более двух слоев.

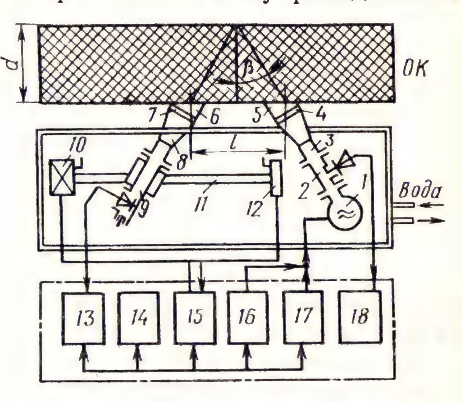


Рис. 2.18. Структурная схема прибора СТ-11Л:

1 — генератор; *2* — проходная детекторная секция; *3*, *8* — излучающая и приемная рупорные антенны; *4*, *7* — металлопластинчатые линзы; *5*, *6* — согласующие призмы; *9* — детекторная секция; *10—12* — механизмы перемещения приемной антенны; *13—18* — блоки усиления, питания, управления и индикации

В *геометрическом методе* информация о толщине содержится в геометрическом параметре l — расстоянии между точками «входа» и «выхода» радиоволнового пучка. При наклонном падении пучка на диэлектрический слой

$$d = \frac{l}{\sin^2 \beta} (n^2 - \sin^2 \beta)^{1/2},$$

где β — угол падения.

Геометрический метод относится к абсолютным методам и позволяет контролировать толщину плоских слоев практически от нуля до значений, ограниченных мощностью излучения. Для слабо неоднородных диэлектрических сред контроль толщины геометрическим методом может быть осуществлен с погрешностью 2...3%. Существенно и то, что имеется возможность измерения толщины слоя при неизвестном показателе преломления: если задать разные углы падения пучка β_1 и β_2, то в выражение

$$d = l_1 l_2 \left(\frac{\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2}{l_1^2 \sin^2 (2\beta_2) - l_2^2 \sin^2 (2\beta_1)} \right)^{1/2}$$

показатель преломления n не входит.

Для повышения точности контроля можно использовать элементы согласования сопротивления сред (для устранения или ослабления отражений от внешних поверхностей объекта). Метод реализован в приборах РИС-2 и СТ-11Л. Структурная схема прибора СТ-11Л показана на рис. 2.18. Прибор используется для контроля огнеупорной футеровки стекловаренных печей в диапазоне толщин 50 ... 500 мм с погрешностью 10 ... 15%.

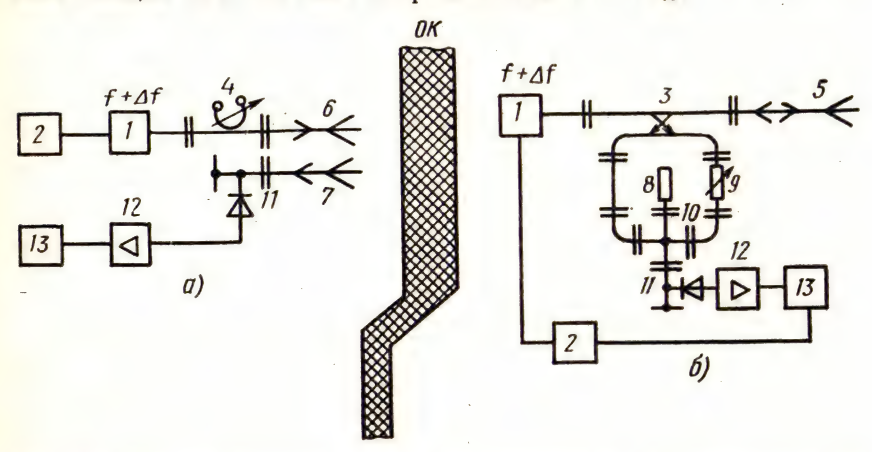


Рис. 2.19. Частотно-фазовый метод в двухантенном (*а*) и одноантенном (*б*) вариантах:

1 — перестраиваемый генератор СВЧ; *2* — модулятор; *3* — симметричный направленный ответвитель; *4* — волномер; *5* — приемно-передающая антенна, *6* — передающая антенна; *7* — приемная антенна; *8* — нагрузка; *9* — аттенюатор: *10* — двойной тройник; *11* — детекторная секция; *12* — усилитель; *13* — индикатор

Частотно-фазовый метод реализуется при периодическом во времени изменении частоты генератора СВЧ. При перестройке частоты генератора зависимость результирующего отраженного от плоского объекта сигнала является осциллирующей, и искомая толщина

$$d = N\Lambda c/[n(f_2 - f_1)],$$

где Λ — период осцилляций; N — число периодов; f_2, f_1 — крайние значения частоты перестройки; c — скорость света.

На рис. 2.19 показаны варианты схем реализации частотно-фазового метода. Если изменять частоту генератора СВЧ и регистрировать разность частот Δf, соответствующую ближайшим экстремальным значениям отраженного от диэлектрического слоя сигнала, то можно определить толщину материала $d = c/(4n\Delta f)$. Чтобы исключить из выражения показатель преломления, необходимо провести измерение при другом значении толщины и соответственно другой разности частот $\Delta f'$, что при совместном решении двух полученных уравнений дает

$$d = |\pm \Delta d| \Delta f' / |\Delta f' - \Delta f|.$$

Частотно-фазовый метод позволяет измерять толщину диэлектрических сред способом на отражение в широком интервале толщин с погрешностью 3 ... 6%.

Весьма перспективное направление толщинометрии — *радиоволновая эллипсометрия.* В основе метода лежит преобразование линейно поляризованной волны при отражении от ОК в волну, поляризованную по эллипсу, и измерение параметров последнего. На принципах эллипсометрии создан СВЧ-измеритель толщины пленок СИТ-1. Толщину тонких металлических пленок в диапазоне 0,01 ... 0,2 мкм на диэлектрических подложках можно контролировать, измеряя азимут эллипса, а толщину диэлектрических пленок в диапазоне 1 ... 100 мкм на металле — измеряя эллиптичность. Наиболее универсальный и надежный путь обработки результатов эллипсометрических измерений — численное решение основных уравнений эллипсометрии [8]. При этом поляризационные характеристики отраженной волны определяются с погрешностью до $\pm 1\%$, показатель преломления и толщина слоя — с погрешностью до ± 3 и $\pm 8\%$ соответственно.

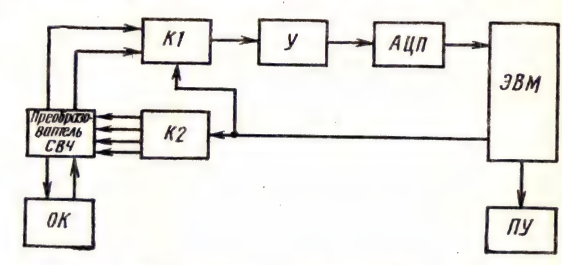


Рис. 2.20. Структурная схема прибора, реализующего многочастотный метод

Существуют и другие методы СВЧ-измерений параметров тонких металлических и диэлектрических пленок на подложках, например метод, основанный на зависимости тока генератора СВЧ от изменения параметров ОК. Это так называемый автодинный эффект. На этом принципе работает прибор СИТ-40.

В наиболее распространенных методах толщинометрии выходной сигнал, используемый для градуировки индикаторного прибора в значениях толщины, представляет функцию двух переменных: толщины и диэлектрической проницаемости материала ОК. В этой связи целесообразно более подробно рассмотреть *двухпараметровый многочастотный метод* НК. Многочастотный метод заключается в измерении коэффициента отражения от поверхности ОК (в общем случае многослойного) на ряде фиксированных частот, число которых равно или превышает число параметров, подлежащих контролю. Подставляя в формулы для коэффициента отражения его измеренные значения, получим систему нелинейных уравнений, где не известны исследуемые параметры — толщина измеряемых слоев и диэлектрическая проницаемость материалов. Эту систему можно решать численными методами.

Структурная схема прибора, реализующего многочастотный метод, показана на рис. 2.20. Так как информация считывается на трех и более частотах, то для переключения частот генератора G служит коммутатор К2. Для измерения модуля коэффициента отражения необходимы два канала (два электрических сигнала), поочередно подключаемые через усилитель (У) к АЦП через коммутатор К1. Для документирования процесса контроля служит печатающее устройство (ПУ).

Прибор работает следующим образом. ЭВМ управляет коммутатором К2, который обеспечивает переключение частот. Отраженный от ОК сигнал и сигнал от генератора через СВЧ-преобразователь подаются на коммутатор К1, который по команде ЭВМ поочередно подключает выход СВЧ-преобразователя через усилитель к АЦП. Сигналы в цифровой форме поступают в ЭВМ, где находится их отношение, дающее модуль коэффициента отражения. Затем цикл повторяется для всех используемых частот. После перестройки генератора на последнюю частоту и получения информации с АЦП ЭВМ прекращает запрос данных и определяет толщину слоев. Затем ЭВМ выводит вычисленные значения толщины на печатающее устройство и одновременно посылает управляющий сигнал на коммутатор К2. Цикл повторяется.

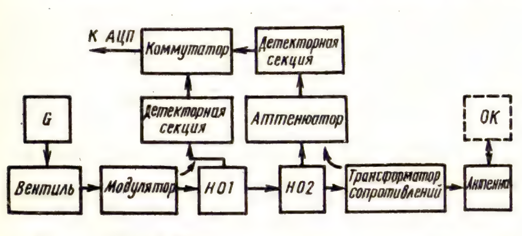


Рис. 2.21. Функциональная схема преобразователя СВЧ, реализующего многочастотный метод

Функциональная схема преобразователя СВЧ приведена на рис. 2.21. Направленный ответвитель $НО_1$ выбирается с переходным ослаблением 3 дБ, обеспечивающим деление энергии генератора, поступившей через вентиль и модулятор, поровну между двумя выходными плечами, а направленный ответвитель $НО_2$ — с полной связью; отраженная энергия полностью переходит из основного плеча во вспомогательный волновод. При таком распределении мощности в каждый ответвитель приходит по 50% падающей энергии, что удобно для настройки преобразователя. Аттенюатор служит также для выравнивания напряжений на детекторных секциях при коротком замыкании антенны (при закрытой проводящим листом апертуре), подключенной через трансформатор волновых сопротивлений.

Знание диэлектрических параметров контролируемых материалов необходимо для правильного выбора пределов перестройки частоты генератора СВЧ, оценки параметров прибора и прежде всего мощности его излучения. Кроме того, важно знать

степень неоднородности материалов, выраженную через пространственную вариацию значений ε_r, определяющую в конечном счете погрешность измерения толщины. Неоднородность материалов можно оценить с помощью выражения

$$H=\frac{\sum\limits_{1}^{n-1}|\Pi_m-\Pi_{m+1}|n}{\sum\limits_{1}^{n}\Pi_m(n-1)}\cdot 100,$$

где Π — измеряемый параметр; n — число измерений параметра на различных участках ОК на рабочей длине волны или в рабочем диапазоне длин волн; $m=\overline{1,\ n}$ — порядковый номер измерения.

В настоящее время известен ряд методов измерения диэлектрических свойств материалов (см. кн. 3 данной серии), однако практический выбор метода определяется, как правило, не только требуемой точностью измерения, но и наличием подходящей аппаратуры, а также возможностью изготовления образцов из материала ОК. Значения относительной диэлектрической проницаемости ε_r' и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика можно определить, измерив постоянную распространения $\gamma_\varepsilon=\alpha_\varepsilon+j\beta_\varepsilon$ для волновода, заполненного исследуемым материалом. При этом связь между α_ε, β_ε и ε_r', $\operatorname{tg}\delta$ определяется выражениями:

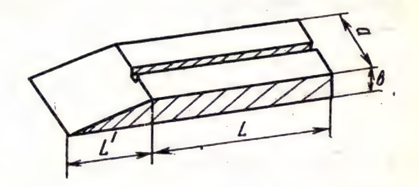


Рис. 2.22. Образец для измерения ε'_r и $\operatorname{tg}\delta$ волноводным методом

$$\varepsilon_r=\varepsilon_r'-j\varepsilon_r'',\qquad \operatorname{tg}\delta=\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'},\qquad \varepsilon_r''=\frac{\alpha_\varepsilon\lambda_0}{\pi\lambda_{\text{в}\varepsilon}},$$

$$\varepsilon_r'=1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в}}}\right)^2+\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в}\varepsilon}}\right)^2-\left(\frac{\lambda_\varepsilon\lambda_0}{2\pi}\right)^2\approx\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2+\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{в}\varepsilon}}\right)^2.$$

Здесь λ_0 — длина волны генератора в свободном пространстве; $\lambda_{\text{кр}}=2a$ — критическая длина волны H_{10} основного типа; a — размер широкой стенки волновода; $\lambda_{\text{в}\varepsilon}=2\pi/\beta_\varepsilon$ — длина волны в волноводе, заполненном исследуемым диэлектриком; β_ε — постоянная распространения (фазовая постоянная); α_ε — постоянная затухания.

Образец исследуемого материала (рис. 2.22) помещается внутрь измерительной линии. При измерении значения ε_r' линию необходимо нагрузить на короткозамыкающий поршень; в этом

случае точность измерения ε_r' около 0,5%. Для измерения $\operatorname{tg}\delta$ материала на выходе линии устанавливается хорошо согласованная нагрузка ($k_{\text{ст}\,U} \leqslant 1{,}05$). При этом погрешность измерения $\operatorname{tg}\delta$ составляет 10 ... 20%, а ε_r' — 1%.

Измерение диэлектрических свойств материалов производится по следующей методике. Снимается и строится зависимость выходного сигнала измерительной линии от положения зонда относительно измеряемого образца. Эта зависимость носит осциллирующий характер, что обусловлено наличием стоячей волны в образце. По расстоянию между двумя соседними минимумами l, а также по значениям напряжения в этих минимумах рассчитывают $\lambda_{\text{в}\varepsilon} = 2l$ и постоянную затухания

$$\alpha_\varepsilon = \frac{|U_{\min 1} - U_{\min 2}|}{l U_{\max}},$$

где $U_{\min}$ и $U_{\max}$ — абсолютные значения напряжения в минимуме и максимуме стоячей волны.

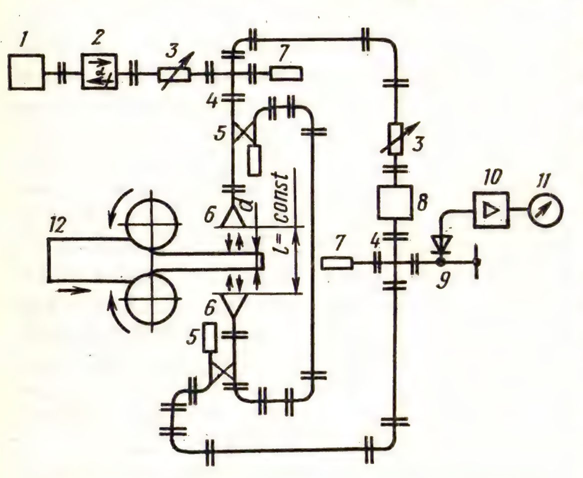


Рис. 2.23. Принципиальная схема устройства контроля толщины металлического листа:

1 — генератор; *2* — вентиль; *3* — аттенюатор; *4* — двойной тройник; *5* — направленный ответвитель; *6* — приемно-передающая антенна; *7* — нагрузка; *8* — фазовращатель; *9* — детекторная секция; *10* — усилитель; *11* — индикатор; *12* — прокатываемый металлический лист

Используя приведенные соотношения с учетом измеренных значений $\lambda_{\text{в}\varepsilon}$ и α_ε, определяют значения ε_r' и $\operatorname{tg}\delta$. Для реализации указанной точности измерений измерительная линия предварительно градуируется на образцах из однородных материалов.

Фазовый метод применяют для бесконтактного автоматизированного контроля толщины металлических лент, полос, проката при двустороннем расположении антенн датчика относительно ОК (рис. 2.23). В этом случае смещения ОК между антеннами не влияют на результаты контроля. Применение рупорно-линзовых антенн уменьшает расходимость пучков, позволяя получить значения $k_{\text{ст}\,U}$ около 120, что обеспечивает высокую чувствительность и низкую погрешность (около 1%) в диапазоне длин волн 3 ... 10 см при поперечных перемещениях листа до $\lambda_0/6$.

2.3.2. Дефектоскопия и контроль физико-механических характеристик материалов

Объекты из диэлектриков, полупроводниковых материалов и композитов могут иметь дефекты следующих типов (см. кн. 1 данной серии): нарушения сплошности (расслоения, отслоения, непроклеи, воздушные включения, трещины и т. п.); инородные включения (металлические и диэлектрические с отличными от основного материала диэлектрическими свойствами), имеющие разнообразные формы и размеры; структурные неоднородности (изменения плотности и пористости, отсутствие или недостаток связующего, неравномерное распределение вещества — негомогенность состава или смеси, технологические или эксплуатационные проявления анизотропии и т. д.). С другой стороны, все дефекты разделяются на локальные (соизмеримые и меньшие длины волны) и протяженные (бóльшие длины волны). Классический пример локального дефекта — воздушный пузырь в диэлектрической стенке, пример протяженного дефекта — расслоение с размерами в несколько длин волн.

Неоднородности любого типа вызывают изменение волны, прошедшей через материал или отраженной от него. При этом меняются амплитуда, фаза, поляризация волны, а также коэффициенты отражения, преломления. Структурные неоднородности обнаруживают также, используя явления рассеяния, дифракции и интерференции. Если размеры неоднородностей невелики по сравнению с длиной волны, то основную роль при их обнаружении играют рассеяние и дифракция. Теоретически, чем меньше длина волны, тем вероятнее надежное выявление более мелких структурных неоднородностей. Однако практический выбор длины волны определяется и другими факторами: при укорочении длины волны возрастает поглощение (рассеяние) в среде и убывает относительная допустимая неоднородность материала, выраженная через отношение $\Delta n/n$. Поэтому оптимальную длину волны находят теоретически и экспериментально. Чувствительность зависит также от выбранного метода и схемы прибора, реализующего метод, от типа и размеров антенн и т. д. При прочих равных условиях повышение надежности контроля связано с применением в дефектоскопии методов корреляционного анализа и синхронного накопления, а также методов многопараметрового контроля (см. кн. 5 данной серии).

Протяженный дефект (например, расслоение) рассматривается как появление в системе дополнительного промежуточного слоя с отличными от основной среды свойствами. Если электрофизические параметры дефекта мало отличаются от свойств среды и размер в направлении распространения волны также мал, то определяющую роль в обнаружении дефекта играет изменение фазы волны.

Локальный дефект рассматривается, как правило, в качестве источника рассеяния и дифракции. Рассеивающие свойства объекта характеризуются эффективной поверхностью рассеяния, определяемой выражением

$$\sigma = \lim_{L \to \infty} 4\pi L^2 |S_s/S_i|,$$

где S_s — плотность потока энергии рассеянного поля на расстоянии L от объекта (дефекта); S_i — плотность потока энергии падающей плоской волны.

При диэлектрической или иной анизотропии сигнал в приемной антенне зависит от угла между плоскостью поляризации излученной электромагнитной волны и направлением главных осей тензора диэлектрической проницаемости на данном участке ОК. После прохождения анизотропного слоя волной, поляризованной по кругу, в общем случае получается волна, поляризованная по эллипсу, которую можно представить в виде суммы двух волн, поляризованных по кругу вправо и влево с разными амплитудами:

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_0 \sqrt{2}}{4} (T_x^2 + T_y^2 + 2T_x T_y \cos \Delta)^{1/2};$$

$$E_{\text{лев}} = \frac{E_0 \sqrt{2}}{4} (T_x^2 + T_y^2 - 2T_x T_y \cos \Delta)^{1/2};$$

$$\Delta = \Phi_x - \Phi_y,$$

где E_0 — амплитуда излучаемой волны; T_x и T_y — коэффициенты прохождения слоя по амплитуде для волн, поляризованных в плоскостях $x0z$ и $y0z$ (z — направление распространения); Φ_x и Φ_y — фазовые набеги при прохождении слоя волнами E_x и E_y.

Если приемная антенна принимает волны, поляризованные по кругу влево, а также $T_x \approx T_y = T$, то напряжение сигнала в приемной антенне

$$U = \frac{1}{4} k E_0 T^2 \sin^2 \frac{\Delta}{2},$$

где k — апертурный коэффициент.

Для контроля объектов способом на отражение в настоящее время используется ряд методов: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый, поляризационный, геометрический и поверхностных волн.

Схемы многих дефектоскопов построены на основе двойного волноводного тройника в качестве моста СВЧ. Если симметричные плечи тройника имеют одинаковую нагрузку, то отраженные волны СВЧ не проходят в выходное плечо тройника, мост согласован, а сигнал на выходе детекторной секции равен нулю.

Баланс моста, как правило, устанавливают, изменяя положение перестраиваемых элементов опорного плеча (рис. 2.24, *а*) при постоянных значениях зазора и толщины изделия на образцовом объекте или на бездефектном участке ОК. Обычно тройник выполняется с высокой степенью развязки плеч E и H (60 ... ... 70 дБ), что и определяет высокую чувствительность дефектоскопов, позволяя выявлять набег фазы до 0,02 ... 0,002 рад, изменения модуля коэффициента отражения до $2 \cdot 10^{-3}$, $\Delta\varepsilon_r/\varepsilon_r$ от

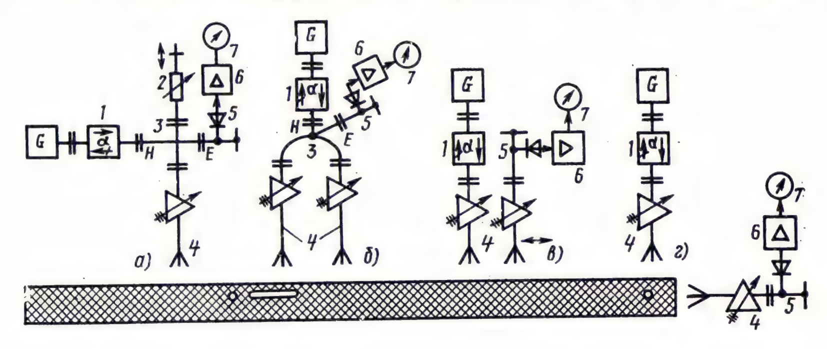


Рис. 2.24. Типичные схемы амплитудно-фазовых дефектоскопов, работающих на отражение:

1 — вентиль; *2* — опорное плечо; *3* — двойной тройник; *4* — антенна; *5* — детекторная секция; *6* — усилитель; *7* — индикатор

0,19 до 0,002 и расслоение с раскрывом от 0,05 до 0,005 мм. Минимальные значения относятся к случаю контроля диэлектрического листа, расположенного на металлическом «зеркале» при коэффициенте отражения около 1,0, а максимальные — к случаю контроля без подложки с коэффициентом отражения около 0,1. Возможно также обнаружение локальных воздушных включений с размерами (0,05 ... 0,01)λ_r.

Достоинство таких дефектоскопов состоит в наглядности показаний и легкой их расшифровке, так как всем участкам ОК, характеристики которых значительно отличаются от характеристик образца, соответствуют высокие уровни выходного сигнала. С помощью одноканальных (одноантенных) амплитудно-фазовых дефектоскопов можно обнаружить разные типы дефектов — от локальных до протяженных и равномерно распределенных, проявляющихся в изменении средних значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. Основные мешающие факторы — переменная толщина ОК и изменение зазора. Если зазор можно стабилизировать, то изменение толщины при дефектоскопии описанным способом устранить невозможно, что приводит к снижению достоверности результатов контроля.

Схема дефектоскопа на рис. 2.24, *б* лишена указанных недостатков. Здесь опорное плечо из управляемых аттенюатора и

короткозамыкателя заменено второй антенной. Симметричные плечи двойного волноводного тройника повернуты в одну сторону, так что антенны параллельны и направлены в сторону ОК. Оба плеча тройника рабочие. Неоднородности выявляются в результате сравнения коэффициентов отражения от двух участков объекта, находящихся под антеннами. При одинаковой электрической длине рабочих плеч схема самобалансируется и не реагирует на изменения зазора, толщины и диэлектрических свойств контролируемого слоя, если эти изменения происходят одновременно и одинаково под обеими антеннами. Любое изменение параметров слоя под одной из антенн по сравнению с параметрами слоя, находящегося под другой антенной, приводит к нарушению баланса моста и появлению сигнала на выходе детекторной секции.

Недостаток такой схемы состоит в том, что она фиксирует только границы протяженных неоднородностей, но не дает информации об изменении свойств ОК в целом, а также в том, что результат зависит от перекоса датчика. Однако основное достоинство схемы состоит в возможности контроля объектов с различными свойствами, толщиной и при переменном зазоре без перестройки режима. На этом принципе основана работа СВЧ дефектоскопа СД-12Д.

На рис. 2.24, *в* приведен упрощенный вариант схемы амплитудно-фазового дефектоскопа с двумя антеннами, расположенными рядом, одна из которых передающая, другая — приемная. Опорным здесь служит сигнал связи между антеннами, который может регулироваться путем изменения их относительного положения. Вследствие воздействия большого фона, создаваемого отражением волн от бездефектного участка ОК, чувствительность схемы к дефектам меньше, чем в вариантах рис. 2.24, *а*, *б*. Этот фон можно уменьшить, поворачивая приемную антенну вокруг оптической оси на 90°, что соответствует случаю скрещенных поляризаций приемной и передающей антенн. В этом случае чувствительность схемы максимальна только к таким неоднородностям и дефектам, при отражении от которых происходит максимальный (до 90°) поворот плоскости поляризации первоначально линейно поляризованных волн — схема становится поляризационно чувствительной.

На рис. 2.24, *г* приведен вариант схемы амплитудно-фазового дефектоскопа, являющегося амплитудным дефектоскопом при пространственном разнесении и расположении антенн таким образом, что приемная антенна реагирует только на рассеянную дефектом волну. Контроль оптимален при дефектоскопии объектов с размерами, соизмеримыми в трех измерениях: кубов, параллелепипедов и т. д.

Поляризационные дефектоскопы (рис. 2.25), фиксирующие изменение поляризации волн СВЧ, пригодны для обнаружения

различных деполяризующих дефектов в изотропных материалах, но наиболее перспективно их применение для контроля диэлектрической и технологической анизотропии, а также внутренних действующих или остаточных напряжений в диэлектрических ОК. Чувствительность поляризационных дефектоскопов зависит от расположения дефекта, например трещины, по отношению к вектору поляризации падающей волны. Поэтому применение волны с переменной (круговой) поляризацией дает более надежные результаты. При наличии дефекта изменяется поляризация отраженной волны — возникает эллиптически поляризованная волна, баланс схемы нарушается и на выходе появляется сигнал разбаланса, соответствующий дефекту.

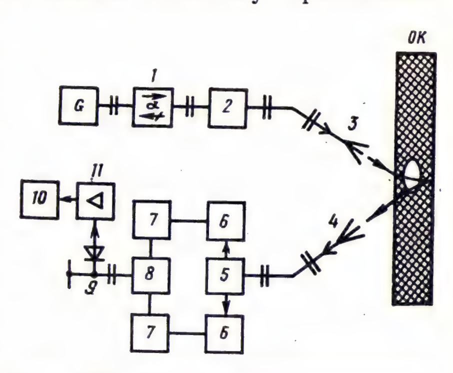


Рис. 2.25. Схема поляризационного дефектоскопа с круговой поляризацией падающих волн:

1 — развязывающий элемент; *2* — поляризатор; *3* — передающая антенна; *4* — приемная антенна; *5* — анализатор поляризации (турникетное соединение волноводов); *6—8* — элементы балансной схемы; *9* — детекторная секция; *10* — индикатор; *11* — усилитель

Для повышения достоверности контроля можно использовать комбинацию схем, показанных на рис. 2.24. Например, если к рабочему выходу тройника *3* (рис. 2.24, *а*) вместо антенны *4* подключено Н-плечо тройника по схеме рис. 2.24, *б*, а рядом с парой приемно-передающих антенн дифференциального дефектоскопа расположена ортогонально и симметрично пара приемных антенн, подключенных к третьему тройнику, то получается схема трехканального дефектоскопа, в котором реализованы три метода: амплитудно-фазовый с опорным плечом, амплитудно-фазовый дифференциальный и поляризационный.

На этом принципе основана работа дефектоскопа СН-20П, предназначенного для контроля нарушений сплошности и изменения свойств объектов из диэлектрических материалов. Дифференциальный канал регистрирует нарушение сплошности в материале по фазе и амплитуде электромагнитных волн, отраженных от соседних участков ОК. Балансный канал обеспечивает контроль свойств, для этой цели используется образцовое плечо. Настройка на образец или бездефектный участок производится с помощью поршня и аттенюатора балансного тройника. В поляризационном канале регистрируется сигнал о наличии анизотропии и в совокупности с балансным или дифференциальным каналами обеспечивается получение дополнительной информации, позволяющей проводить разделение дефектов.

Выявляемые дефекты: расслоение с раскрытием 0,1 мм и площадью 1 см² на глубине до 20 мм; поры, раковины диаметром от 1 мм на глубине до 15 мм и диаметром от 3 мм на глубине 15 ... 40 мм; трещины с раскрытием 0,1 мм длиной 1 см на глубине до 10 мм. Длина волны излучения 8 мм.

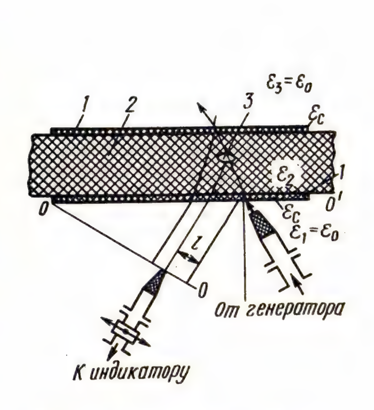


Рис. 2.26. Схема дефектоскопа, использующего геометрический метод:

1 — согласующая пластина; *2* — ОК; *3* — дефект

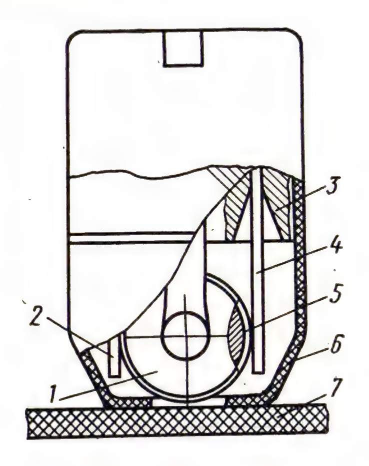


Рис. 2.27. СВЧ-преобразователь дефектоскопа СД-10АМ:

1 — металлический ролик; *2, 4* — диэлектрический волновод; *3* — секториальный рупор; *5* — диэлектрическое кольцо; *6* — ферроэпоксидное основание; *7* — ОК

Дефектоскопы, построенные на основе геометрического метода, целесообразно использовать для обнаружения и локализации дефектов. На рис. 2.26 показана схема реализации указанного метода с применением согласующих пластин, устраняющих отражения от границ раздела ОК. Сигнал от дефекта выделяется в «чистом» виде, давая наиболее точную информацию о геометрии, пространственном положении и глубине залегания дефекта.

Суть метода состоит в том, что если оптические оси передающей и приемной антенн направить под одинаковым углом к поверхности ОК и датчиком сканировать поверхность, то максимум сигнала при наличии дефекта будет при таком положении датчика и антенн, когда их оптические оси (после преломления лучей) сходятся на дефекте. При этом наряду с обнаружением дефекта определяют глубину его залегания и форму путем сканирования. При использовании в антеннах датчика контактных призм из того же материала, что и ОК, отпадает необходимость в согласующей пластине на передней границе раздела.

Метод поверхностных волн основан на приеме и анализе поверхностных замедленных волн, возбуждаемых в связанных неодинаковых диэлектрических волноводах, одним из которых является плоско-слоистый ОК, другим — расположенная параллельно ему активная диэлектрическая антенна.

Радиоволновой дефектоскоп СД-10АМ [10] предназначен для контроля дефектов в слоистых диэлектрических изделиях и покрытиях на металлических и диэлектрических основаниях. Антенна (рис. 2.27) состоит из диэлектрического кольца, укрепленного на внешней цилиндрической поверхности металлического ролика, и двух диэлектрических волноводов, касающихся кольца по его диаметру. Вместе с секториальными рупорами диэлектрические волноводы образуют два согласованных волноводно-диэлектрических перехода. Один переход соединен с генератором СВЧ и предназначен для возбуждения в диэлектрическом кольце поверхностной волны, другой служит для передачи энергии СВЧ, прошедшей через систему объект — диэлектрическое кольцо и электрически управляемый аттенюатор, на вход детекторной секции.

Возбужденное диэлектрическое кольцо и расположенный в непосредственной близости от него плоско-слоистый ОК образуют электрически связанную систему различных диэлектрических волноводов, в которой распространяются поверхностные волны. Фазовые скорости распространения волн и их амплитуды зависят от диэлектрических свойств ОК и антенны, их размеров и расстояния между ними. Изменение диэлектрических свойств ОК или появление в нем дефектов приводит к изменению амплитудно-фазовых характеристик связанных волн как в ОК, так и в антенне.

Метод обладает высокой чувствительностью к микрорасслоениям в ОК, ориентированным параллельно поверхности слоев, из-за появления скачка нормального компонента вектора электрического поля волны Е-типа. Наибольшая эффективность взаимодействия и локальность контроля достигаются выбором параметров антенны-резонатора и радиуса диэлектрического кольца.

Прибор состоит из двух основных узлов: преобразователя СВЧ и электронного блока, соединенных между собой электрическим кабелем. Преобразователь СВЧ выполнен в малогабаритном ручном исполнении и содержит модуль генератора СВЧ, приемно-излучающую антенну, электрически управляемый аттенюатор и детекторную секцию, заключенные в корпус, основание которого изготовлено из ферроэпоксида. Основание одновременно служит защитным элементом конструкции и эффективным поглотителем энергии СВЧ, экранирующим антенну от внешних и внутренних переотражений. В верхней части корпуса расположена сигнальная лампочка индикатора дефекта.

При ручном контроле преобразователь устанавливается на поверхность ОК без зазора и перемещается по всей поверхности в любом направлении. При механизированном контроле преобразователь располагается таким образом, чтобы внешняя цилиндрическая поверхность кольцевого волновода касалась объекта, а плоскость, в которой находится кольцо, была перпендикулярна его поверхности. При сканировании диэлектрический волновод вращается вместе с роликом, т. е. преобразователь как бы катится по поверхности объекта.

Электронный блок дефектоскопа выполнен в виде настольного прибора и содержит источник питания, устройство управления и согласующее устройство.

Устройство управления реализовано на базе микропроцессорного комплекта К580 и содержит дешифратор адресов, перепрограммируемое запоминающее устройство (ППЗУ) с памятью емкостью 4 Кбайт для хранения программ и оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Устройство управления реализует алгоритм измерения, преобразования, калибровки и индикации в реальном масштабе времени под управлением программы, записанной в ППЗУ при считывании управляющих и информационных данных из согласующего устройства и записи в него соответствующих команд. Согласующее устройство по командам, поступающим на шины данных и адресов от управляющего устройства обеспечивает ввод, преобразование и вывод информации на восьмиразрядный люминесцентный цифровой индикатор, а также на звуковой сигнализатор дефекта, на сигнальную лампочку СВЧ преобразователя и на внешнее цифропечатающее устройство.

При установке датчика на стандартный образец в ОЗУ запоминаются данные о сигнале. Микропроцессор управляет автоматической калибровкой выходного сигнала преобразователя СВЧ и регулирует ток через аттенюатор так, чтобы сигнал с детектора соответствовал значению, заданному оператором и хранящемуся в ОЗУ. Автоматическая калибровка производится в течение всего времени, пока измеренный сигнал находится в 6%-ной относительно калибровочного значения зоне.

Основные технические характеристики прибора СД-10АМ

Частота, ГГц	$33{,}3 \pm 0{,}15$
Порог чувствительности (раскрытие расслоения при минимальной площади 0,8 см^2), мм	0,09
Предел допускаемой основной погрешности определения границ дефекта, мм, не более	4,5
Разрешающая способность на глубине до 4,5 мм, не более, мм	9
Диапазон контролируемых толщин, мм	0,5 ... 8

Пределы изменения относительной диэлектрической проницаемости контролируемых материалов	2 ... 5
Максимальная производительность контроля, м/с	0,3
Габаритные размеры, мм:	
СВЧ-преобразователя	80×55×135
электронного блока	355×325×150

В ряде практических задач требуется получить визуальную картину внутренней структуры ОК. Например, радиополярископ ЛЭТИ с автоматическим сканированием и записью изображения на фотопленке применяют для визуализации линий равной анизотропии, т. е. равной упорядоченности частиц в текстуре материала. В основу действия прибора положен радиополяризационный метод, предложенный и развитый В. Н. Рудаковым.



Рис. 2.28. Линии анизотропии в срезах цилиндрических заготовок высоковольтных изоляторов после выхода из шнекового пресса

На рис. 2.28 показаны фотографии линий равной анизотропии в срезах двух заготовок высоковольтных изоляторов, сформированных шнековыми вакуум-прессами разных конструкций; рис. 2.28, *б* соответствует годным изделиям после обжига, рис. 2.28, *а* — бракованным (трещины в осевой части).

Примером реализации радиоволнового метода для контроля приповерхностной *плотности* блоков и плиток из пеноматериалов и других диэлектриков в диапазоне 60 ... 350 кг/м³ служит прибор СП-10А, структурная схема которого изображена на рис. 2.29. Работа прибора основана на физических явлениях, имеющих место при полном внутреннем отражении электромагнитной волны: проникновении волны в менее плотную среду и продольном смещении максимума отраженного пучка. В результате при угле падения электромагнитной волны, большем кри-

тического, и фиксированных положениях передающей и приемной антенн амплитуда принимаемого сигнала изменяется при изменении диэлектрической проницаемости материалов ОК, которая для указанных материалов линейно связана с их объемной плотностью [А. с. № 1504623, СССР].

Выходной сигнал преобразователя СВЧ обрабатывается электронным блоком и индуцируется на цифровом индикаторе в единицах контролируемого параметра с погрешностью не более ±5%.

Измерение, преобразование, калибровка и индикация осуществляются по программе, записанной в ППЗУ устройства управления, реализованного на базе микропроцессорного комплекта К580. При отсутствии объекта в зоне контроля оператор устанавливает необходимый уровень сигнала, который при нажатии на кнопку «*Калибр*» запоминается в ОЗУ устройства управления и при дальнейшей работе прибора поддерживается автоматически. По указаниям, высвечиваемым на цифровом индикаторе, оператор калибрует прибор по двум стандартным образцам, входящим в его состав, после чего прибор готов к работе. Контролируемый материал (при небольших размерах образцов) помещается непосредственно на основание призмы преобразователя либо преобразователь ставится на образец, и его плотность определяется по показанию цифрового индикатора непосредственно в г/см³.

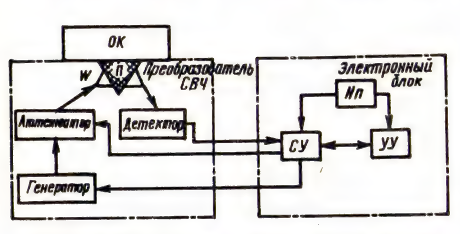


Рис. 2.29. Структурная схема прибора СП-10А:

W — антенны; П — призма полного внутреннего отражения; СУ — согласующее устройство; *УУ* — устройство управления; ИП — источник питания

Прибор может быть предварительно проградуирован для проведения измерений на двух материалах. Переход от одного материала к другому осуществляется нажатием на соответствующую кнопку переключателя на передней панели. Глубина контроля 10 мм (в 8-мм диапазоне радиоволн), площадь зоны контроля 40×40 мм².

В производстве полимерно-композиционных материалов и особенно при автоматизированном приготовлении резиновых смесей важное значение приобретает своевременный контроль гомогенности (однородности) состава материала. Радиоволновой прибор СН-30АФ (рис. 2.30) предназначен для бесконтактного экспресс-контроля гомогенности резиновых и других диэлектрических смесей. Действие прибора основано на сравнении коэффициентов отражения от двух соседних участков ОК. Прибор состоит из преобразователя и электронного блока с выхо-

дом на регистрирующее устройство. Отличается от аналогичных приборов повышенной чувствительностью, меньшими габаритами и массой.

Основные технические характеристики прибора СН-30АФ

Толщина контролируемого слоя материала, мм	2 ... 30
Относительная диэлектрическая проницаемость материала	2 ... 16
Минимальная площадь выявляемых неоднородностей, мм²	100
Частота, ГГц	10
Порог чувствительности приемного тракта, мкВ	10
Габариты, мм:	
электронного блока	300×125×230
преобразователя	130× 80 ×190
Масса, кг	6

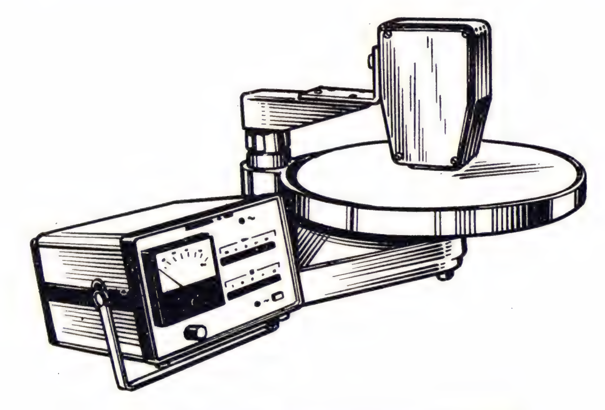


Рис. 2.30. Внешний вид прибора СН-30АФ

На рис. 2.31 показана функциональная схема СВЧ-преобразователя прибора СН-30АФ. Если свойства (состав) смеси под антеннами одинаковые, то отраженные волны равны по амплитуде и фазе. Следовательно, результирующий сигнал в Е-плече тройника равен нулю, а в Н-плече и детекторной секции *6* — максимален. Из-за отличия свойств материала происходит фазовый сдвиг отраженных волн до 180°, результирующий сигнал максимален в Е-плече тройника и равен нулю в Н-плече. Поэтому введение в схему преобразователя вычитающего устройства приводит к дополнительному увеличению чувствительности в результате увеличения крутизны результирующего информационного сигнала от контролируемого параметра.

Радиоволновые приборы для контроля *вязкости* полимерных материалов и связующих, *содержания компонентов* и процесса

отвердевания связующего основаны на использовании корреляции между искомыми параметрами и диэлектрическими свойствами среды. Схемы разработанных средств контроля и примеры их использования описаны в [15].

Быстрое и точное измерение *влажности* необходимо для обеспечения высокого качества многих видов продукции. Применение для этой цели радиоволновых методов основано на контрасте диэлектрических свойств воды и «сухих» (обезвоженных) диэлектрических сред. На рис. 2.32 приведены зависимости ε_r' и $\operatorname{tg}\delta$

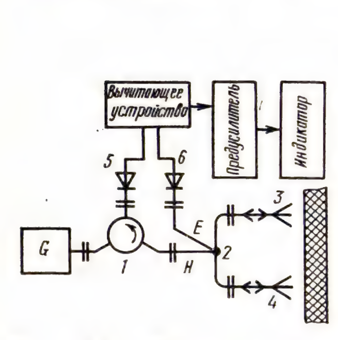


Рис. 2.31. Функциональная схема СВЧ-преобразователя прибора СН-30АФ:

1 — циркулятор; *2* — двойной волноводный тройник; *3, 4* — приемно-передающие антенны; *5* и *6* — детекторные секции

Рис. 2.32. Зависимость ε'_r и $\operatorname{tg}\delta$ воды от частоты электромагнитных волн

воды от частоты электромагнитных колебаний. Анализ показывает, что в коротковолновой части диапазона (длина волны 10 см и менее) зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от частоты имеет максимум, а значения ε_r' еще велики. Для сухих материалов область значений $\varepsilon_r' \approx 1{,}5 \dots 10$ и $\operatorname{tg}\delta \approx 10^{-2} \dots 10^{-4}$. Таким образом, значения ε_r' воды превышают значения ε_r' сухих материалов на порядок, а $\operatorname{tg}\delta$ — в сотни раз.

При увлажнении среды получается как минимум двухкомпонентная смесь, диэлектрическая проницаемость которой определяется выражением

$$\varepsilon_{см} = y_в \varepsilon_в + y_с \varepsilon_с,$$

где $\varepsilon_в$ — диэлектрическая проницаемость воды; $\varepsilon_с$ — диэлектрическая проницаемость сухого материала; $y_в$ и $y_с$ — объемная концентрация воды и материала среды соответственно. Так, в 3-см диапазоне радиоволн $\varepsilon_в = 59 (\operatorname{tg}\delta_в = 0{,}46)$, а для пенополистирола $\varepsilon_с = 1{,}5 (\operatorname{tg}\delta_с \leqslant 10^{-3})$. При увлажнении до $W = 10\%$ $\varepsilon_{см}$ меняется, как показано в табл. 2.3.

Анализ разработанных схем СВЧ-влагомеров показывает, что в большинстве радиоволновых приборов реализована методика

контроля на прохождение, когда увлажненный участок ОК вызывает резкое изменение (уменьшение) амплитуды сигнала за счет увеличения отражения и поглощения.

Таблица 2.3

W, %	1	2	3	4	5	10
$\varepsilon_{см}$	2,08	2,65	3,23	3,80	4,38	7,25

На рис. 2.33 приведена классическая схема преобразователя СВЧ-влагомера в режиме на прохождение. Чувствительность схемы повышают, вводя опорный (компенсационный) канал, основу которого составляют аттенюатор *W7* и фазовращатель *W8*. Измерения можно автоматизировать, выполнив элементы *W7* и *W8* электрически управляемыми, и тогда ток управления является мерой влажности ОК.

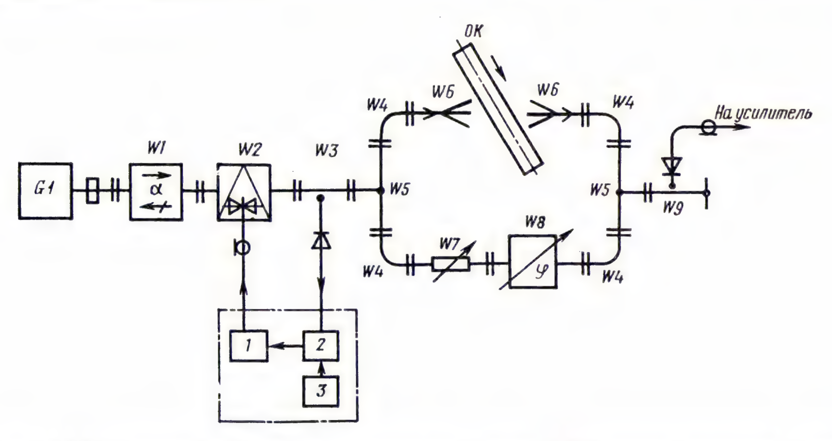


Рис. 2.33. Принципиальная электрическая схема СВЧ-преобразователя влагомера, работающего на прохождение (классическая схема):

1 — устройство управления; *2* — устройство сравнения; *3* — источник стабилизированного опорного сигнала

Следует отметить, что если материал мелкодисперсный и диаметр частиц не превышает $0{,}1\lambda_{в}$, то влиянием дисперсности частиц можно пренебречь и считать зависимость ослабления электромагнитного излучения материалом от его влажности практически линейной. На рис. 2.34 показана экспериментальная зависимость ослабления N электромагнитного излучения от влажности при $\lambda=3$ см, полученная на образцах вспененного полистирола толщиной $d_1=20$ мм и $d_2=30$ мм в режиме контроля на прохождение; раскрыв рупорных антенн 50×50 мм.

Реже используются схемы на отражение, но они бывают единствено возможными в реализации при одностороннем доступе к ОК. Влагомер, работающий на отражение, может быть построен по амплитудно-фазовой схеме, в которой используется зависимость коэффициента отражения от влажности. Такой влагомер обладает высокой чувствительностью, так как в нем обычно используется мостовая схема на основе двойного волноводного тройника. Диапазон измеряемой влажности 15 ... 30%, погрешность измерения около ±0,5% в рабочем диапазоне излучения 10 ГГц. Однако рабочий диапазон температур ограничен 20 ... ... 30 °С либо 5 ... 40 °С. Погрешность влагомера зависит от постоянства толщины и плотности материала, а также от надежности работы устройства, фиксирующего положение материала в рабочей зоне датчика.

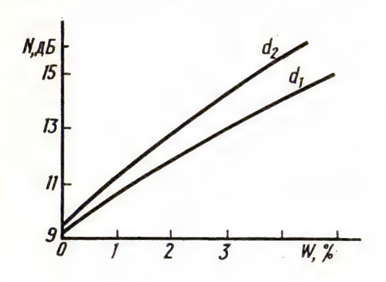


Рис. 2.34. Зависимость ослабления СВЧ-излучения, прошедшего через слой вспененного полистирола, от его влажности

Чтобы исключить влияние толщины, используют метод «бесконечного» слоя, т. е. метод поверхностного отражения, выбирая более короткую длину волны в миллиметровом диапазоне. С другой стороны, для уменьшения влияния шероховатости, неоднородностей структуры и для объемных измерений влажности предпочтительней длинноволновой участок диапазона радиоволн СВЧ. Таким образом, при выборе длины волны СВЧ влагомера необходимо найти компромиссное решение исходя из конкретных требований и условий контроля. В амплитудных СВЧ-влагомерах, работающих в режиме на отражение, в качестве основного элемента часто используют направленный ответвитель или циркулятор для разделения падающей и отраженной от объекта контроля волн. Следует отметить, что в некоторых случаях для повышения точности СВЧ-влагомера совмещают оба режима работы — на прохождение и отражение, используя при этом канал отраженной волны для компенсации или внесения поправок в результат контроля.

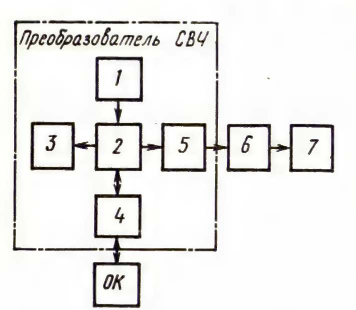


Рис. 2.35. Структурная схема СВЧ-влагомера, работающего на отражение:

1 — электрически перестраиваемый генератор СВЧ; *2* — широкополосный направленный ответвитель; *3* — широкополосная нагрузка (поглотитель); *4* — линзовая антенна; *5* — детекторная секция; *6* — усилитель; *7* — индикатор

Учитывая в общем случае осциллирующий характер зависимостей модуля и аргумента коэффициента отражения (а следовательно, и коэффициента прохождения) от диэлектрической проницаемости материала, связанной с влажностью, а также от толщины ОК, можно сделать вывод о неоднозначности результатов измерения влажности и необходимости поиска способов подавления влияния мешающих факторов. Одним из таких способов является электрическая перестройка частоты генератора СВЧ с измерением среднего значения информативного сигнала. Для достижения желаемого результата необходимо электрически перестраивать генератор СВЧ в полосе частот не менее 4 ... 5 ГГц.

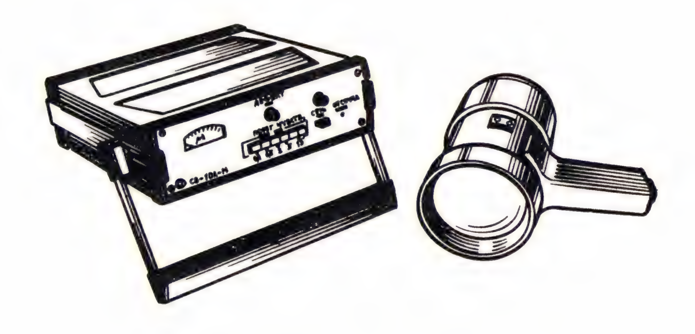


Рис. 2.36. Внешний вид прибора СВ-10АМ

На рис. 2.35 показана структурная схема СВЧ-влагомера 8-мм диапазона, реализующего электрическую перестройку частоты, а на рис. 2.36 — его внешний вид. Используется амплитудный метод обнаружения и индикации влаги в диэлектрических теплозащитных материалах, покрывающих металлические конструкции. Коэффициент отражения радиоволн от диэлектрика с весьма малыми потерями, нанесенного на металл, близок к единице. При наличии влаги (в результате возрастания в диэлектрике потерь) коэффициент отражения от металла резко уменьшается. Для снижения влияния изменений толщины контролируемого материала и зазора между преобразователем и объектом контроля генератор СВЧ работает в полосе частот, а отраженный сигнал принимается асинхронно, т. е. по среднему значению. Превышение порогового значения влажности отображается индикатором.

Прибор весьма чувствителен к влажности в слабо поглощающих сухих диэлектрических материалах, нанесенных на металлическую подложку.

Основные технические характеристики прибора СВ-10АМ

Порог чувствительности к локальной влаге, г	0,1
Толщина объектов контроля, мм	10 ... 80
Диаметр зоны контроля, мм	20
Электрофизические параметры сухих материалов (в 8-мм диапазоне радиоволн):	
относительная диэлектрическая проницаемость	1,1 ... 4
тангенс угла потерь, не более	$1\cdot10^{-3}$
Габаритные размеры, мм:	
электронного блока	$80\times260\times300$
преобразователя (с ручкой)	$110\times265\times200$
Масса, кг:	
электронного блока	5
преобразователя	1,3

Снизить влияние толщины материала на результаты контроля влажности можно, используя резонансный метод, предложенный Е. Ф. Кондратьевым. При внесении в резонатор объекта контроля резонансная частота изменяется на Δf относительно начального значения f_0, соответствующего пустому резонатору, так что

$$\Delta f/f_0 = -\eta(\varepsilon_r' - 1)/2,$$

где ε_r' — действительная часть диэлектрической проницаемости образца; η — коэффициент заполнения, который в простейшем случае определяется по формуле $\eta = \varepsilon_r' V_{обр}/V$, где $V_{обр}$ — облучаемый объем образца; V — объем резонатора. Тогда

$$V_{обр}/V = -2\Delta f/[f_0 \varepsilon_r'(\varepsilon_r' - 1)].$$

Уменьшение добротности резонатора

$$\Delta Q = Q_0 - Q_\varepsilon = Q\varepsilon_r''\eta = 2\Delta f Q \varepsilon_r''/[f_0(\varepsilon_r' - 1)],$$

где Q_0 — собственная добротность; Q_ε — добротность резонатора с образцом; $Q = (Q_0 + Q_\varepsilon)/2$; ε_r'' — мнимая часть диэлектрической проницаемости образца.

Изменение напряжения ΔU на квадратичном детекторе, связанном с резонатором, при изменении добротности на ΔQ

$$\Delta U = kP\Delta Q/(2\pi f_0),$$

где k — коэффициент преобразования детектора; P — мощность, отдаваемая генератором в резонатор.

После соответствующих преобразований получим

$$\Delta U = \frac{kP\Delta f Q}{\pi f_0^2} \; \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r' - 1}.$$

Из этого выражения следует, что сигнал на детекторе чувствителен как к ε_r'', так и к ε_r'. Результаты эксперимента показали, что при реализации описанного метода амплитуда напряжения сигнала слабее зависит от толщины ОК, чем от влажности. Например, относительное изменение амплитуды сигнала при резонансе, соответствующее изменению толщины образца в 4 раза, составляет всего 0,03, а относительное изменение амплитуды напряжения при изменении влажности на 1% (в диапазоне 0 ... 10%) — 0,05.

Структурная схема прибора СВ-10Р, использующего резонансный метод, изображена на рис. 2.37. В качестве генератора СВЧ использован серийный полупроводниковый генератор Ганна М 31106 3-см диапазона радиоволн, настроенный на частоту 10,13 ГГц. Развязывающим элементом служит стандартный ферритовый вентиль 3 ВВ-100Б. Проходная детекторная секция выполнена на диоде ДКВ-8. В качестве полуоткрытого резонатора используется волноводный переход с прямоугольного сечения 23×10 мм на круглое сечение диаметром 30 мм; длина перехода 100 мм. Полуоткрытый резонатор отделен от волноводной системы круглой диафрагмой диаметром 8 мм. На выходном круглом фланце резонатора укреплена защитная пластина из фторопласта толщиной в половину длины волны.

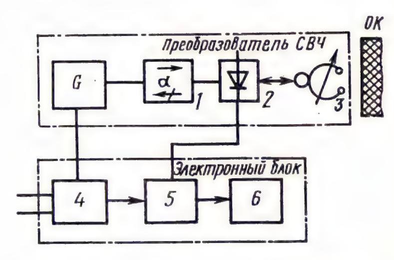


Рис. 2.37. Структурная схема прибора СВ-10Р (резонансный метод):

1 — вентиль; *2* — проходная детекторная секция; *3* — полуоткрытый резонатор; *4* — источник питания; *5* — усилитель; *6* — индикатор

При настройке прибора выходное сечение полуоткрытого резонатора закорачивают металлической пластиной, чтобы получить закрытый резонатор, и определяют собственную частоту этого резонатора. Затем частоту генератора уменьшают на величину Δf, чтобы резонанс наступал при удалении короткозамыкающей пластины от выходного фланца на некоторое расстояние. Частота генератора СВЧ выбирается такой, чтобы в момент резонанса расстояние от торца полуоткрытого резонатора до поверхности ОК составляло 6 ... 10 мм, чем обеспечивается бесконтактный процесс измерения влажности. Следовательно, резонансная система, образованная диафрагмой, волноводным переходом, воздушным зазором и эффективной отражающей поверхностью ОК, может быть названа полуоткрытым резонатором.

Такой резонатор перестраивается плавным изменением воздушного зазора (перемещением отражающей поверхности объекта, образца) в направлении нормали к выходному фланцу. Мо-

мент совпадения резонансной частоты с частотой питающего генератора СВЧ может быть зафиксирован по характерному изменению амплитуды и фазы стоячей волны в волноводе, соединяющем генератор с полуоткрытым резонатором. При правильном расположении детектора относительно узлов и пучностей стоячей волны напряжение на выходе детектора имеет экстремальное значение в момент резонанса. Окончательно положение рабочего детектора подбирается экспериментально, а первоначальная установка производится в положение, совпадающее с узлом напряженности электрического поля стоячей волны при закорачивании полуоткрытого резонатора металлической пластиной.

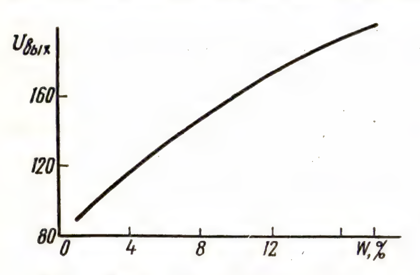


Рис. 2.38. Экспериментально полученная градуировочная характеристика резонансного влагомера СВ-10Р

Предварительная градуировка индикатора прибора производится на имитаторах в виде набора диэлектрических пластин из материалов с известными значениями диэлектрической проницаемости. В частности, 1%-ной влажности соответствует $\varepsilon_r=2{,}08$, имитатором может быть тефлон с $\varepsilon_r=2{,}02$; 2%-ной влажности соответствует $\varepsilon_r=2{,}65$, в качестве имитатора может быть использовано оргстекло ($\varepsilon_r=2{,}61$).

Перед началом работы устанавливают нуль индикатора при максимальной чувствительности прибора и преобразователя СВЧ, направленного на свободное пространство. Затем к преобразователю (торцу полуоткрытого резонатора) подносят сухой образец, при этом стрелка индикатора едва отклоняется ($\leqslant 1{,}5$ ... 2 дел.). Образец взвешивают, равномерно увлажняют (распылением) до 1% от массы образца и фиксируют резонанс. На рис. 2.38 изображена экспериментально полученная зависимость амплитуды выходного напряжения от влажности вспененного полистирола. Погрешность измерения около 1% в диапазоне влажности до 80%.

Следует заметить, что для измерения влажности применяют и электроемкостные методы и средства (см. кн. 3 данной серии).

Для настройки аппаратуры перед испытанием, а также для периодической поверки используют контрольные образцы или имитаторы. Контрольные образцы снабжаются аттестатами, в которых указаны их форма, размер, масса, размеры и глубина залегания дефектов. Контрольные образцы можно заменить имитаторами, эквивалентными по влиянию на параметры сигнала. В качестве имитатора образцов толщины может быть применена пара прецизионных волноводных устройств — аттенюа-

тор и фазовращатель, с помощью которых можно задать с высокой точностью требуемые изменения амплитуды и фазы, эквивалентные изменениям на контрольных образцах.

2.3.3. Техника безопасности при работе с аппаратурой СВЧ

При работе с аппаратурой СВЧ необходимо выполнять требования ГОСТ 12.1.006—84 «Электромагнитные поля радиочастот», а также соблюдать «Санитарные нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот», утвержденные Минздравом СССР.

Облучение в интенсивном поле СВЧ живых тканей приводит к изменению их свойств. Различают две основные по характеру воздействия группы эффектов: связанные с интенсивностью облучения (интегральные эффекты) и резонансные, проявляющиеся в слабых полях на определенных частотах.

Максимальная излучаемая мощность аппаратуры и максимальная плотность излучаемой энергии в зоне присутствия обслуживающего персонала указываются в технических условиях на приборы конкретных типов, причем максимальные значения плотности не должны превышать предельно допустимых значений, установленных нормами.

Электромагнитное излучение в диапазоне частот 300 МГц... 300 ГГц оценивается поверхностной плотностью потока энергии (ППЭ) излучения и создаваемой им энергетической нагрузкой (ЭН) — суммарным потоком энергии, проходящим через единицу облучаемой поверхности за время действия t и выражаемым произведением ППЭ$\times t$. Нормативное значение ЭН за один рабочий день не превышает 200 мкВт·ч/см^2, а максимальное значение ППЭ должно быть не более 1000 мкВт·/см^2.

Санитарными нормами установлено, что при ППЭ 1000 мкВт/см^2 можно работать не более 15 мин, при 100 мкВт/см^2 — не более 2 ч, а при 10 мкВт/см^2 — в течение всего рабочего дня.

В случаях необходимости проведения работ в условиях, отличающихся от установленных нормами, следует пользоваться защитными средствами и материалами. Грамотное их применение — одно из основных требований техники безопасности.

Для защиты рабочего места от повышенной энергетической нагрузки необходимо использовать радиопоглощающие материалы, экраны, рассеиватели. Выбор материала осуществляют в зависимости от интенсивности и частоты излучения. Хорошо зарекомендовали себя радиопоглощающие материалы из резины с повышенным содержанием сажи. Такие экраны в виде листов имеют к тому же внешнюю поверхность с периодическими выступами. Размер выступов зависит от частотного диапазона,

в котором используется поглощающий материал, и обычно составляет примерно $\lambda/4$. В результате уменьшается отражение от поглотителя и оно не носит зеркального характера. Часто резиновые листы дополнительно армируются металлической сеткой из хорошо проводящего материала (меди), представляющей сетчатый экран. В этом случае прошедшая энергия не превышает 1% от падающей. Таким образом, применением радиопоглощающих материалов снижают энергетическую нагрузку до установленных норм и ниже.

Для защиты локальных участков тела (например, глаз, лица) применяют защитные очки, маски и т. п. Очки выполняют из оптически прозрачных материалов, экранирующих СВЧ-излучение (обычно это тонкопленочные покрытия из хорошо проводящих материалов).

Резонансные эффекты в практике радиоволнового НК не проявляются в связи с ограничением практического применения характерных участков СВЧ-диапазона радиоволн.

Задачи

2.3.1. Определить частоту генератора СВЧ, при которой возможно однозначное измерение толщины диэлектрических материалов с $\varepsilon_r \leqslant 4$ амплитудно-фазовым методом в диапазоне толщин 0 ... 12,5 мм.

Ответ: $\lambda = 10$ см.

2.3.2. Определить модуль коэффициента отражения от диэлектрического слоя с расслоением. Задано: $\lambda_0 = 3$ см; $d = 20$ мм; $\varepsilon_{r2} = 4$; $\operatorname{tg}\delta \leqslant 10^{-3}$; расслоение — протяженное с раскрытием 0,5 мм, глубина его залегания 10 мм. Выбрать и обосновать метод контроля и структурную схему дефектоскопа.

2.3.3. Рассчитать параметры и выбрать материал имитатора для резонансного влагомера. Задано: $\lambda_0 = 3$ см; $\varepsilon_c = 2$, $\operatorname{tg}\delta_c \leqslant 10^{-3}$; $d = 10$ мм; $W = 5$, 10 и 20%.

Указание. Для подбора материала воспользуйтесь справочной литературой (например, [1, с. 207]).

2.3.4. Определить экранирующий эффект пластины из оргстекла толщиной 5 мм, покрытой слоем алюминия толщиной в 1 мкм, если $\lambda_0 = 3$ см.

Указание. Определяйте ослабление сигнала пленкой из алюминия, затем — коэффициент отражения от диэлектрического слоя и вызванное этим ослабление сигнала.

Глава 3

ОПТИЧЕСКИЙ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

§ 3.1. ВВЕДЕНИЕ

В результате взаимодействия оптического излучения с веществом изменяются пространственно-временные распределения амплитуды, фазы, поляризации, степени когерентности волны. Изменения проявляются в *интерференции, дифракции, преломлении, отражении, рассеянии, дисперсии* волн. Возможны также изменения характеристик ОК — механооптических, магнитооптических, акустооптических, фотопроводимости и др. Благодаря большому объему информации об ОК, переносимой оптическими излучениями, удается решить большой круг практических задач. К их числу относятся задачи контроля геометрических параметров продукции — проката, проволоки, труб, прутков, профилей; плоских, сферических и асферических оптических поверхностей; диаметра текстильных нитей; стеклянных листов; строительных конструкций; шахтных стволов; изделий авиастроения, полупроводниковых структур, фотошаблонов, вакуумных приборов и т. д.

Оптические излучения используются также для контроля состава веществ: структуры пластмасс и полимеров, концентрации растворов, структуры тканей, концентрации примесей вредных веществ в воздухе и воде, состава нефти и нефтепродуктов, качества продуктов питания.

Отдельная область применения оптических методов контроля — обнаружение дефектов на поверхности непрозрачных и внутри прозрачных ОК: контроль качества внутренней поверхности труб, обнаружение инородных включений в стеклянных изделиях, жировых плен в материалах, мест утечки газа и нефти и т. д.

Тепловые методы контроля позволяют получить дополнительную информацию об ОК, которая также переносится оптическими излучениями. С их помощью контролируют качество сборки электронных узлов, надежность контактов высоковольтных линий передачи, правильность сборки электродвигателей, параметры непрозрачных для оптического излучения ОК и дефекты в них, отслоений асфальтобетонных покрытий от основы, появление внутренних раковых опухолей (медицина) и т. д.

В этой главе в сжатой форме рассмотрены методы решения перечисленных задач и технические средства, используемые для реализации этих методов.

§ 3.2. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Различают свыше 30 типов источников оптического и теплового излучения. По способу генерирования они разделяются на температурные, люминесцентные и лазерные. Элементарные акты испускания излучения одинаковы для всех способов и связаны с переходом атомов из возбужденного состояния в устойчивое.

Температурные источники излучения. С ростом температуры тела энергия поступательного, колебательного и вращательного движения его частиц увеличивается. Вращение молекул вокруг оси обусловливает излучение в дальней инфракрасной области. При дальнейшем увеличении температуры начинаются колебания ядер молекул, которые проявляются в испускании коротковолновых инфракрасных излучений. При еще большей температуре энергия колеблющихся частиц увеличивается настолько, что в результате их соударений между собой меняется состояние внешней электронной оболочки атомов. Такое изменение вызывает излучение в видимом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Указанные виды излучений определяются температурой тела и называются тепловыми. Спектральная плотность тепловых излучений описывается законом Планка.

Испускание ОК электромагнитного излучения обусловлено колебаниями электрических зарядов вещества и связано с изменениями энергетических уровней атомов, молекул, электронов, ионов.

Обозначим через N_m среднее число атомов системы, находящихся в m-м состоянии и обладающих энергией W_m, и назовем эту величину *заселенностью* m-го уровня. В отсутствие внешних воздействий часть из них самопроизвольно может перейти в состояние с меньшей энергией — спонтанное испускание излучения. При переходе с уровня m на уровень n средняя мощность спонтанного испускания Φ^c_{emn} пропорциональна энергии фотона $h\nu_{mn}$ и заселенности N_m:

$$\Phi^c_{emn} = A_{mn} h \nu_{mn} N_m, \tag{3.1}$$

где A_{mn} — коэффициент Эйнштейна для спонтанного испускания, c^{-1}, представляющий вероятность самопроизвольного перехода $m \to n$. Очевидно, спонтанное излучение не когерентно.

Поглощение фотона с частотой $\nu_{mn} = (W_m - W_n)/h$ связано с переходом атома из более низкого энергетического состояния W_n в более высокое W_m. Мощность, поглощаемая вследствие переходов $n \to m$, пропорциональна заселенности N_n:

$$\Phi^{п}_{nm} = B_{nm} h \nu_{mn} N_n M_e(\nu_{mn}), \tag{3.2}$$

где B_{nm} — вероятность поглощения фотона в единицу времени, c^{-1}, зависящая только от свойств атома; $M_e(\nu_{mn})$ — спектральная плотность мощности.

При облучении атомов фотонами наблюдается не только процесс их поглощения, приводящий к появлению переходов $n \to m$, но (как показывает опыт) возникают и обратные переходы $m \to n$ из возбужденного состояния в основное, сопровождающиеся испусканием фотонов с частотой падающего излучения. Такие фотоны образуют так называемое вынужденное (индуцированное) излучение, которое в отличие от спонтанного характеризуется совпадением направления распространения, частоты, фазы и поляризации с падающим. Мощность вынужденного излучения

$$\Phi^{\text{в}}_{mn} = B_{mn} h\nu_{mn} N_m M_e(\nu_{mn}), \tag{3.3}$$

где B_{mn} — коэффициент Эйнштейна для вынужденного испускания. Если $M_e(\nu_{mn})=0$, вынужденных переходов не будет.

Таким образом, под действием внешнего поля в веществе наблюдается два типа переходов — связанные с поглощением и испусканием фотонов.

Процесс излучения сопровождается потерей энергии, и при невосполнении ее убыли состояние излучающей системы непрерывно изменяется. Условие равновесия $\Phi^{\text{с}}{}_{mn}+\Phi^{\text{в}}{}_{mn}=\Phi^{\text{п}}{}_{nm}$ с учетом (3.1)—(3.3) запишем в виде

$$A_{mn}N_m + B_{mn}N_m M_e(\nu_{mn}) = B_{nm}N_n M_e(\nu_{mn}). \tag{3.4}$$

Из курса физики известно, что концентрация атомов в равновесном состоянии вещества подчиняется *распределению Больцмана*

$$N_i = A_i \exp\left[-W_i/(k_{\text{Б}}T)\right], \tag{3.5}$$

где A_i — нормирующий множитель; $k_{\text{Б}}=1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура, К.

Разрешив (3.4) относительно $M_e(\nu_{mn})$, используя формулы Эйнштейна

$$A_n B_{nm} = A_m B_{mn}, \quad A_{mn} = h\,(2\pi\nu_{mn})^3 B_{mn}/(2\pi^3 c^3)$$

и учитывая, что приведенные соотношения справедливы для любой частоты ($\nu_{mn}=\nu$), получаем известную формулу Планка

$$M_e(\nu, T) = \frac{h\,(2\pi\nu)^3}{2\pi^3 c^3}\left(e^{h\nu/(k_{\text{Б}}T)}-1\right)^{-1}. \tag{3.6}$$

На практике она чаще записывается как функция длины волны $\lambda=c/\nu$. С учетом равенства $M_e(\nu, T)\,d\nu = -M_{e\lambda}(T)\,c\,d\lambda/\lambda^2$ имеем

$$M_{e\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5}\,\frac{1}{\exp(c_2/\lambda T)-1}\ [\text{Вт}\cdot\text{м}^2\cdot\text{мкм}], \tag{3.7}$$

где постоянные $c_1=3{,}7415\cdot10^8$ Вт·м$^{-2}$ мкм^4; $c_2=1{,}43879\cdot10^{-2}$ м·К.

Выражения (3.6) и (3.7) справедливы для описания так называемого *абсолютно черного тела* (АЧТ), полностью поглощающего падающее излучение на всех длинах волн и со всех возможных направлений, и наряду с *формулой Стефана — Больцмана*

$$M_e = \int_0^{\infty} M_{e\lambda}(T)\,d\lambda = h_{\text{Б}}T \tag{3.8}$$

($h_{\text{Б}}=5{,}6697\cdot10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$) используются при расчете приборов дистанционного измерения температуры.

Функция Планка (3.7) широко используется в тепловых расчетах, и существуют подробные таблицы ее значений для различных λ и T [24]. Полезно также знать простые приближенные зависимости вида

$$\int_{\Delta\lambda} M_{e\lambda}(T)\,d\lambda \simeq A_a T + B_a. \tag{3.9}$$

Для диапазноа $\lambda \in 8 \dots 14$ мкм значения коэффициентов в (3.9) и относительная погрешность аппроксимации δ приведены в табл. 3.1.

В природе не существует абсолютно черных тел, и для реальных тел закон Стефана — Больцмана не соблюдается. Плотность потока излучения зависит не только от температуры, но и от свойств поверхности ОК. Эта зависимость учитывается *коэффициентом излучения* ε_λ, называемым также спектральной степенью черноты.

Таблица 3.1

Значения коэффициентов в формуле (3.9)

Коэффициент	Температурный диапазон $T_{min}-T_{max}$, К				
	263 ... 303	283 ... 323	303 ... 343	323 ... 363	343 ... 383
A_a,	2,194	2,67	3,156	3,642	4,123
Вт/(м²·К)	—487,25	—626,84	—777,46	—938,86	—1108
B_a, Вт/м²	0,0174	0,0131	0,010	0,0077	0,0061
δ					

В ограниченных спектральных диапазонах $\Delta\lambda$ можно принять $\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{\Delta\lambda} = \text{const}$, и тогда плотность излучения

$$M_e(\Delta\lambda, T) = \varepsilon_{\Delta\lambda} \int\limits_{\Delta\lambda} M_{e\lambda}(T)\,d\lambda, \tag{3.10}$$

где $\varepsilon_{\Delta\lambda}$ — коэффициент излучения, усредненный по всем направлениям в полусфере и по диапазону длин волн $\Delta\lambda$.

Для условий термодинамического равновесия, определенного направлениями распространения лучей и каждого компонента поляризации, справедлив *закон Кирхгофа*, связывающий спектральную поглощательную α_λ, излучательную ε_λ и отражательную ρ_λ способности: $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$, $(1-\alpha_\lambda) = \rho_\lambda = (1-\varepsilon_\lambda)$.

Среди температурных источников излучения можно выделить эталонные, применяемые для технических целей, и естественные.

Известно, что поток излучения, выходящий через бесконечно малое отверстие в стенке большой замкнутой полости, не нарушает термодинамического равновесия внутри полости. И если обеспечить поддержание постоянной температуры ее стенок, отверстие будет излучать как абсолютно черное тело.

На рис. 3.1 изображены типовые виды полостей технических моделей АЧТ, характеризуемые приближенным значением усредненного коэффициента излучения $\varepsilon_{\Delta\lambda} \approx 1 - \rho d_0^2/4l_0^2$, где ρ — интегральный коэффициент диффузного отражения материала полости; d_0 и l_0 — соответственно диаметр отверстия и глубина полости. На рис. 3.2 приведены зависимости усредненного коэф-

фициента излучения $\varepsilon_{\Delta\lambda}$ от соотношения характерных размеров l_0/d_0 для сферической, конической, цилиндрической и цилиндрической с боковым отверстием полостей. Зависимости рассчитаны по уточненным формулам, учитывающим геометрические

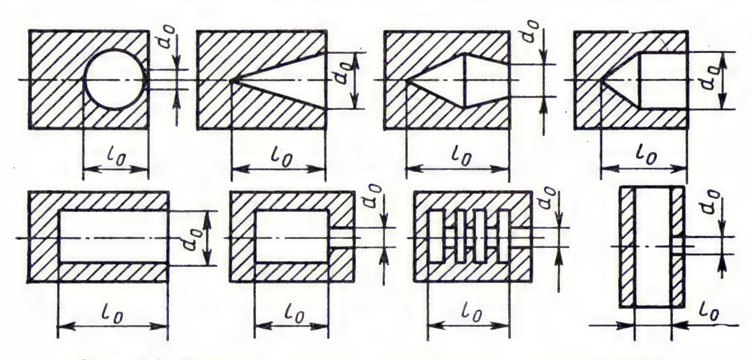


Рис. 3.1. Типовые полости технических моделей АЧТ

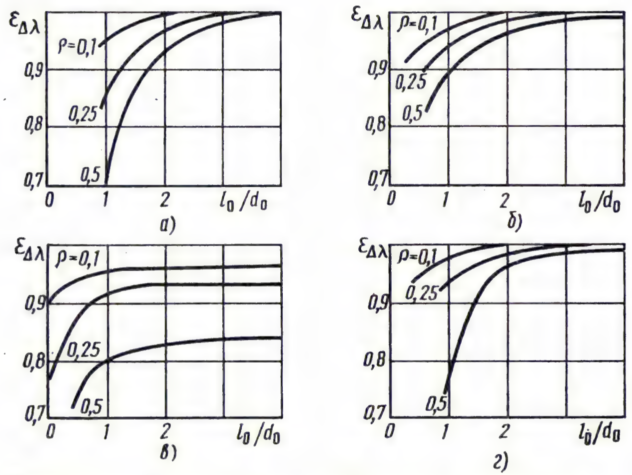


Рис. 3.2. Зависимости усредненного коэффициента излучения от соотношения характерных размеров сферической (*а*), конической (*б*), цилиндрической (*в*) и цилиндрической с боковым отверстием (*г*) полостей

особенности рассматриваемых моделей. Нетрудно видеть, что при $(l_0/d_0)>2$ и $\rho\leqslant 0{,}1$ излучение полостей (за исключением цилиндрической) приближается к излучению АЧТ. Как следует из уточненного выражения

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}=\frac{1-\rho}{(1-\rho)\left[1+(l_0/d_0)-\sqrt{(l_0^2/d_0^2)+1}\right]},$$

цилиндрическую полость можно принять за АЧТ при $(l_0/d_0)\geqslant 10$.

Основным световым эталоном выбрано черное тело при температуре затвердевания платины (2045 К). Конструкция основного светового эталона СССР создана под руководством П. М. Тиходеева в 1948 г. (рис. 3.3). Излучателем служит трубочка из плавленого оксида тория *1*, длина ее 45 мм, диаметр 2,5 мм. При измерениях платину *3* разогревают до плавления (стакан *6* помещен в поле обмотки индукционной высокочастотной печи). Трубочка принимает температуру окружающей ее платины, в процессе затвердевания которой производятся измерения. Мощность нагрева регулируют таким образом, чтобы расплавленный металл остывал очень медленно. При переходе пластины из жидкого состояния в твердое яркость отверстия ($6 \cdot 10^5$ кд/м^2) стабилизируется и в течение 20 мин остается неизменной.

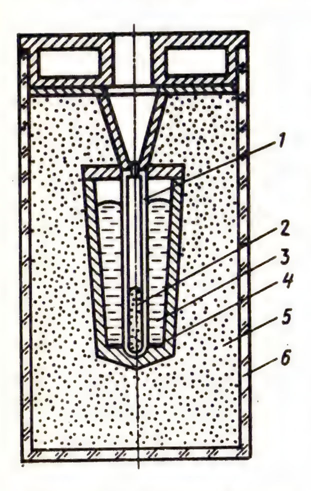


Рис. 3.3. Основной световой эталон:

1 — трубчатый излучатель из плавленого оксида тория; *2* — порошкообразный оксид тория; *3* — платина; *4* — стакан из плавленого оксида тория; *5* — порошкообразный оксид тория; *6* — кварцевый стакан

Существует много конструкций черных тел, которые отличаются методами регулировки температуры, формой и материалом полостей, способами нагревания и т. д. Наиболее удачные из них характеризуются отклонениями коэффициента излучения относительно идеального АЧТ от 0,1 до 1%. Две типовые конструкции АЧТ приведены на рис. 3.4. В конструкции (рис. 3.4, *а*) стенки полости выполнены из материала с большой теплопроводностью и изнутри покрыты платиновой чернью. Для создания в полости одинаковой температуры она заполняется какой-либо жидкостью (жидким воздухом, водой, маслом, жидким металлом). Температура жидкости определяет спектральную плотность излучения.

В конструкции рис. 3.4, *б* сердечник выполнен из нержавеющей стали и имеет коническую полость с $(l_0/d_0) = 8$. Нихромовая обмотка нагрева 7 изолирована от сердечника тонким слоем асбеста. Сигнал платинового термометра *8* используется для регулировки тока в обмотке нагрева таким образом, чтобы поддержать заданную температуру в полости. В табл. 3.2 приведены параметры некоторых моделей АЧТ.

Модели черных тел сложны. Для промышленных целей разработан ряд образцовых излучателей в виде ламп накаливания. Наиболее распространены *светоизмерительные лампы*. Они имеют тело накала, выполненное из вольфрамовых прямых нитей (лент), которые натянуты в габаритах прямоугольника, т. е. расположены в одной плоскости.

В обозначении светоизмерительных ламп (СИС10-5, СИС10-10, СИС107-35 и т. д.) первая цифра после букв означает номинальное напряжение, В, вторая — силу света, кд.

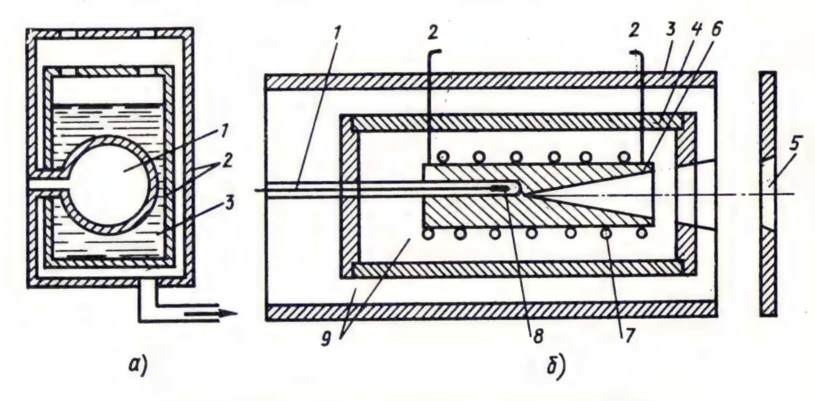


Рис. 3.4. Типовые конструкции моделей АЧТ:

а — полость *1* из материала с большой теплопроводностью; *2* — термостат; *3* — жидкость; *б* — сердечник из нержавеющей стали: *1* — вывод платинового термометра; *2* — блок регулирования температуры; *3* — корпус; *4* — латунный экран; *5* — рабочее отверстие; *6* — сердечник, *7* — электронагревательная обмотка; *8* — термометр; *9* — полости, заполненные асбестом

В качестве образцовых излучателей в инфракрасном диапазоне длин волн используются также *штифт Нерста* и *глобар*. Основным элементом в излучателях Нерста служит стержень (штифт) из тугоплавких оксидов с высоким коэффициентом из-

Таблица 3.2

Параметры моделей АЧТ

Фирма, тип	Температурный диапазон, °С	Поле зрения, град	Коэффициент излучения	Время установления, мин	Потребляемая мощность, Вт
Barnes Eng. Co:					
11-101	(0 ... 230) ±1	20	0,99±1 %	30	100
11-110	(200 ... 600) ±3	20	0,99±1 %	120	100
Infrared Ind:					
IRI 403	(50 ... 710±1	14	0,99±0,01 %	30	250
IRI 408	(200 ... 600) ±1	90	0,99±0,01 %	5	60
IRI 402	(200 ... 1200) ±1	14	0,99±0,01 %	45	380
Electr. Comm. Ep-pley.	(0 ... 1000) ±1	—	0,995	70	700

лучения и длиной до 30 мм. В холодном состоянии он имеет отрицательный коэффициент сопротивления и по своим свойствам приближается к изолятору. При нагревании до 400°С штифт становится проводником и под воздействием проходящего через

него тока нагревается до 2000 К (рис. 3.5, *а*). В диапазоне длин волн, больших 7 мкм, излучатели Нерста рассматриваются как черные тела (рис. 3.5, *б*).

Материалом глобара служит карбид кремния, который не требует предварительного подогрева. При подаче на него напряжения около 100 В стержень разогревается до температуры 700 К, а при нанесении на него покрытия из хлористого тория — до 1400 К. В диапазоне $\lambda = 2 \dots 15$ мкм глобар считается серым телом с коэффициентом излучения $\varepsilon_{\lambda\Delta} = 0{,}8$.

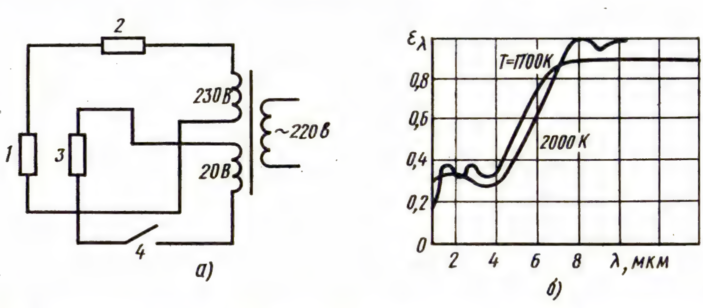


Рис. 3.5. Схема излучателя Нерста (*а*) и его спектральный коэффициент (*б*):
1 — тело накала; *2* — стабилизатор тока; *3* — стартовый нагреватель; *4* — стартовый выключатель

Образцовые излучатели нашли применение для калибровки пирометров, радиометров, различных образцов оптико-электронной аппаратуры.

Для технических целей (нагрев, подсвет объектов при наблюдении и фотографировании и т. д.) обычно применяют излучатели с телами накала в стеклянных оболочках.

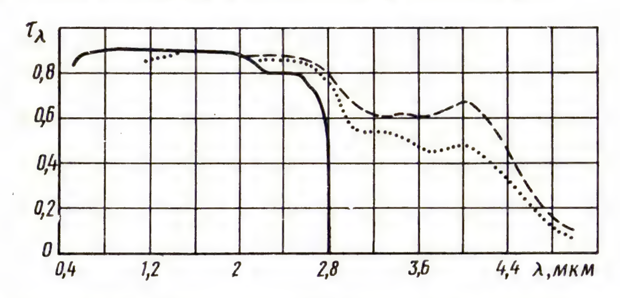


Рис. 3.6. Спектральная характеристика пропускания различных образцов стекол толщиной 1 мм

В зависимости от области применения излучателя стекло должно иметь максимальное пропускание излучения в ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной области спектра. На рис. 3.6 приведены спектральные характеристики пропускания обычных натриево-кальциевых стекол, используемых в источниках, предназначенных для работы в диапазоне 0,4 ... 2,5 мкм.

Кварцевые стекла представляют практически однокомпонентную композицию из кремнезема SiO_2, прозрачную для диапазона излучений 0,2 ... 3 мкм.

В настоящее время промышленностью выпускаются сотни типов ламп накаливания, отличающихся спектральными характеристиками, габаритами, рабочими параметрами. Среди них выделяют лампы общего назначения, предназначенные для нагревания тел, и галогенные. Галогенные лампы отличаются от обычных добавлением в газовую среду иода в количестве 1 моль на 1 $м^3$ объема колбы. Введение иода в газ дает ряд положительных эффектов: увеличивается срок службы лампы, появляется возможность увеличить температуру тела накала, уменьшаются размеры излучателя.

Таблица 3.3

Параметры галогенных ламп

Обозначение	Размеры			Излучательные характеристики			Продолжительность горения, ч
	Длина, мм	Длина тела накала, мм	Диаметр тела накала, мм	λ_{max}, мкм	$I_{\lambda max}$, Вт/(ср·мкм)	$M_{e\ тн}$, Вт/м	
КГТ 220-600	500	430	11	1,30	18,8	$34,6\cdot10^4$	2000
КГТ 220-1300	305	240	10	1,0	81,0	$129,8\cdot10^4$	2500
КГТ 220-2000	500	430	10,75	1,1	82,25	$78,4\cdot10^4$	5000

В СССР создано свыше 100 типов галогенных ламп. Конструктивно они представляют осесимметричную систему: цилиндрическое тело накала (спираль) помещено в трубку из кварцевого стекла. В табл. 3.3 приведены параметры некоторых отечественных ламп. Обозначаются лампы тремя буквами: КГТ — кварцевые галогенные термоизлучатели. Первое число после букв соответствует номинальному напряжению питания (В), следующее число (через дефис) — номинальной мощности (Вт). Индексом I_{max} обозначена сила излучения на длине волны λ_{max}, индексом $M_{e\ тн}$ — плотность излучения тела накала.

Люминесцентные источники излучения. В основу их работы положено явление свечения атомов, молекул, ионов и других более сложных комплексов, возникающее в результате перехода этих частиц из электронного возбужденного состояния в основное. Такой вид свечения наблюдается при нагревании тел до очень высокой температуры. Однако его можно получить и другими более удобными и экономичными способами: облучением тел фотонами оптического (фотолюминесценция) или рентгеновского (рентгенолюминесценция) излучения, в результате воздействия на тела электрического поля (электролюминесценция), при неупругих соударениях вещества с движущимися электронами (катодолюминесценция), при протекании химических реакций (хемилюминесценция). Поглощенная энергия внешнего источника переизлучается возбужденной люминесцентной частицей с некоторой задержкой во времени. Эта особенность отлича-

ет люминесценцию от несобственного излучения тела: рассеянного и отраженного от посторонних излучателей.

Среди источников излучения, в основу работы которых положено явление люминесценции, наибольшее практическое значение для построения средств контроля имеют *газоразрядные лампы*. Газоразрядные лампы созданы в результате поисков экономичных источников света. При газовом разряде энергия, приобретаемая заряженными частицами в электрическом поле, передается нейтральным атомам, которые переходят в возбужденное состояние. При обратном переходе испускается излучение. В преобладающем числе случаев излучение газоразрядных ламп состоит не только из люминесцентного, но и температурного излучения колбы и электродов.

Световая отдача люминесцентных ламп (35 ... 80 $лм \cdot Вт^{-1}$) в 5 ... 6 раз превышает световую отдачу ламп накаливания. Подбором фотолюминофора можно изменять спектральную характеристику излучения.

В лампах ультрафиолетового излучения в качестве люминофора используется силикат бария, активированный свинцом, а колба выполнена из увиолевого стекла. При облучении его излучением на длинах волн 0,185 и 0,254 мкм испускается излучение с $\lambda = 0,3 ... 0,4$ и 0,4 ... 0,5 мкм.

Излучение дугового разряда используется для технических целей в качестве источников инфракрасных излучений. Распространение получили *цезиевые*, *кадмиевые*, *гелиевые* и *ртутно-дуговые лампы* (по типу наполнителя). Они выпускаются в основном мощностью от 50 до 1000 Вт. Созданы также высокоинтенсивные источники света с ксеноновым и криптоновым заполнением мощностью от 2000 Вт (ДКсТ2000) до 50 000 Вт (ДКсТВ50000).

В настоящее время все более широкое применение находит электролюминесценция полупроводников. На этой основе разработаны *излучающие диоды* в видимой и инфракрасной областях спектра. Светоизлучающий диод состоит из полупроводникового кристалла с электронно-дырочным переходом и омическими контактами, а также из элементов для формирования пучка излучения. Использование фокусирующих линз позволило получить сравнительно узкие диаграммы направленности излучения. Ширина спектра электролюминесценции полупроводников не превышает 0,1 мкм. В табл. 3.4 приведены параметры некоторых типов электролюминесцентных диодов. В задачах контроля излучающие диоды используют для определения содержания в воздухе побочных продуктов технологических процессов, для измерения влажности твердых тел и т. д.

Лазеры отличаются от других источников когерентностью испускаемого излучения. В основу работы лазеров положены три основополагающих принципа: возникновения вынужденного из-

лучения при облучении атомных систем фотонами, усиления света в термодинамически неравновесных системах, формирования положительной обратной связи в оптических системах.

Таблица 3.4

Параметры электролюминесцентных диодов (светодиодов)

Тип диода	Минимальная мощность излучения, мВт (сила света, мкд)	Прямое напряжение, В	Угол излучения, град	Быстродействие, мкс	Длина волны максимального излучения, мкм
АЛ 336 К	(150)	2	20	—	0,66
АЛ 336 И	(50)	2,8	30	—	0,565
АЛ 107 Б	10	2	>40	1	0,95
АЛ 106 В	0,6	1,7	25	0,02	0,95
АЛ 115 А	10	2	90	1	0,9 ... 1,0

При распространении излучения в среде оно взаимодействует с атомами среды, и интегральный результат взаимодействия описывается выражением Бугера (1.48), показывающим, что по мере прохождения излучения в среде плотность потока уменьшается по экспоненциальному закону. Механизм уменьшения плотности связан с переходом атомов с более низкого энергетического уровня на более высокий за счет поглощения энергии распространяющегося излучения. Лишь часть квантов (вынужденное излучение) возвращается в поток. Этот механизм характерен для термодинамически равновесных систем, описываемых распределением Больцмана (3.5). Как следует из

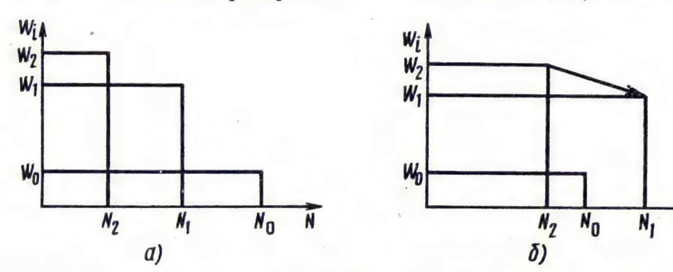


Рис. 3.7. Создание инверсной заселенности в трехуровневой системе:
а — нормальная заселенность; *б* — инверсная заселенность

сопоставления выражений (3.2) и (3.3), для таких систем заселенность верхнего уровня N_i меньше заселенности нижнего: $N_j > N_i$, и поглощение потока при распространении в среде неизбежно.

Если бы удалось обеспечить выполнение условия $N_i = N_j$, пучок через среду распространялся бы без поглощения. При $N_i > N_j$ — условие инверсной заселенности — среда выступала бы как усилитель излучения. Инверсную заселенность энергетических уровней удается осуществить с помощью некоторого воздействия на атомы. Идею этого воздействия можно пояснить с привлечением схемы переходов. На рис. 3.7, *а* показано распределение заселенности в равновесном состоянии системы. При воздействии на систему излучения с частотой $\nu_{02} = (W_2 - W_1)/h$ происходит сближение заселенностей N_0 и N_2 (рис. 3.7, *б*). Этот вывод следует из анализа соотношений (3.2) и (3.3),

выраженных через заселенности, разность которых обратно пропорциональна плотности $M_e(\nu_{02})$. Если создать такие условия, что время жизни атомов на уровне W_2 очень мало и они спонтанно переходят на уровень W_1, время жизни на котором достаточно велико, то в результате накопления атомов на уровне W_1 возникает инверсная заселенность между уровнями W_1 и W_0. Она-то и может быть использована для усиления излучения с частотой $\nu = (W_1 - W_0)/h$, так как в этом случае процессы вынужденного излучения преобладают над поглощением. Среда с описанными свойствами называется активной.

Для осуществления положительной обратной связи часть вынужденного излучения должна оставаться внутри активной среды для поддержания возбуждения атомов, что реализуется с помощью оптического резонатора — двух параллельных зеркал, одно из которых полупрозрачно (рис. 3.8). Между последовательными отражениями от зеркал при прохождении потока через активную среду он усиливается. Происходит усиление излучения только тех длин волн, направление распространения которых совпадает с осью резонатора. При других направлениях волна покидает пределы активной среды. Дойдя до полупрозрачного зеркала, волна частично выходит из системы, образуя лазерное излучение. Если на двойной длине резонатора укладывается целое число длин волн, обеспечивается положительная обратная связь: при очередных прохождениях через резонатор волна согласована по фазе с исходной. По существу, резонатор представляет колебательную систему, в которой собственные колебания (моды) имеют вид стоячих волн с узлами на зеркалах. Частоты мод устанавливаются условием $2l_р = k\lambda$, где $l_р$ — длина резонатора; k — целое число.

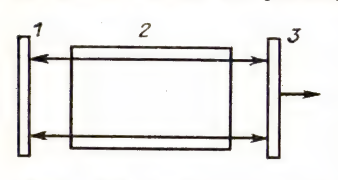


Рис. 3.8. Принципиальная схема лазера:

1 — отражающее зеркало; *2* — активная среда; *3* — полупрозрачное стекло

Таким образом, принцип работы лазера сводится к следующему. В активной среде с помощью постороннего источника энергии создается инверсная заселенность уровней, называемая *накачкой*. Возникающая в каком-либо месте в результате спонтанного излучения волна, направленная вдоль оси резонатора, усиливается за счет вынужденного испускания среды с инверсной заселенностью. При многократном переотражении излучение превышает потери энергии в системе, включая и энергию покинувшего лазерного излучения. Это соответствует началу генерации электромагнитных волн. При импульсной накачке изменение заселенности уровней совпадает по времени с началом очередного импульса. При достижении порога генерации испускается импульс лазерного излучения. При непрерывной накачке излучение может быть как непрерывным, так и импульсным.

Существует большое число модификаций лазеров, отличающихся между собой активными средами, режимами работы, мощностями и рядом других характеристик. Первым квантовым генератором света стал *рубиновый лазер,* созданный в 1960 г. Рубин — это кристалл оксида алюминия Al_2O_3 (корунд), в котором небольшая часть ионов алюминия (около 0,05%) заменена при выращивании ионами хрома Cr^{3+}. По этой причине в кристалле возникают две полосы поглощения — в зеленой и голубой частях спектра. Кроме того, имеется два узких энергетических уровня W_1 и W_1', при переходе с которых на основной уровень излучается свет с длинами волн 0,6943 и 0,6928 мкм.

Схема энергетических уровней рубина изображена на рис. 3.9, *а*. Цилиндрический стержень рубина освещается импульсом белого света от лампы-вспышки, обвивающей его в виде спирали (рис. 3.9, *б*). Голубая и зеленая части спектра поглощаются кристаллом, красная часть отражается. Ионы Cr^{3+} переходят на энергетические уровни в области полос поглощения и через промежуток времени порядка 10^{-8} с безызлучательно переходят на уровни W_1, W_1', передавая избыток энергии колебаниями кристаллической решетки. Время жизни ионов хрома

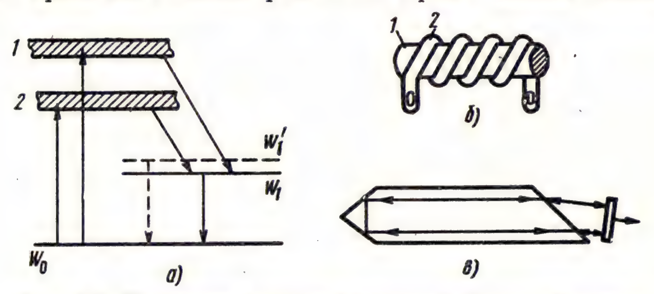


Рис. 3.9. Пояснение принципа работы рубинового лазера:
а — схема энергетических уровней: *1* — голубая; *2* — зеленая полоса; *б* — рубиновый стержень *1* со спиральной лампой-вспышкой *2*; *в* — схема хода лучей в лазере

в состояниях W_1 и W_1' составляет несколько миллисекунд. В течение импульса накачки на уровнях W_1, W_1' накапливаются возбужденные атомы, число которых превышает заселенность уровня W_0. При их переходе на уровень W_0 возникает короткий импульс лазерного излучения. Из-за малой длительности импульса (~ 1 мс) мощность рубинового лазера достигает нескольких киловатт.

Для повышения коэффициента полезного действия один торец кристалла срезают таким образом, чтобы обеспечить полное внутреннее отражение (рис. 3.9, *в*). Второй торец кристалла срезают под углом Брюстера. Поэтому излучение рубинового лазера линейно поляризовано.

Помимо рубина в кристаллических лазерах широко используют и другие активные среды: MgF_2, $CaWO_4$ и др. Длины волн, генерируемых ими, лежат в диапазоне 0,55 ... 2,6 мкм, а коэффициент полезного действия колеблется от сотых долей до единиц процентов. Мощность излучения, обеспечиваемая лазерами на кристаллах, составляет единицы — сотни ватт при работе в непрерывном режиме и достигает 10^9 Вт в импульсном режиме. Основные параметры лазеров приведены в табл. 3.5.

Ознакомившись с источниками излучения, можно ориентировочно выбрать излучатель нужного типа при разработке средств контроля. Марку излучателя выбранного типа можно найти в справочной литературе [17].

Задачи

3.2.1. Сравнить потоки излучения гелий-неонового лазера, излучающего на длине волны $\lambda = 0{,}63$ мкм поток $\Phi_e = 10^{-3}$ Вт при расходимости пучка $\beta'_R = 20$, и лампы накаливания, световой поток которой $\Phi_v = 15\,000$ лм.

Решение

Телесный угол конуса $\Omega_к \approx 0{,}25\pi\beta_к^2$. Световой поток, который пойдет в этом угле от лампы, $\Phi_{v\,к} = 15\,000\,\Omega_к/4\pi = 0{,}032$ лм.

Таблица 3.5

Параметры лазеров

Тип, марка лазера	Активная среда	Длина волны, мкм	Режим генерации	Длительность импульса, с	Частота повторения импульсов, Гц	Расходимость луча, угл. мин	Мощность излучения, Вт
Твердотельные:							
ГОР-0,2	Рубин	0,6943	Импульсный	10^{-4}	—	20 ... 30	2000
ОГМ-20	»	0,6943	»	$2\cdot10^{-5}$	1	2	$2\cdot10^{8}$
ГСИ-1	Стекло с неодимом	1,0600	»	$7\cdot10^{-4}$	0,1	50	10^{5}
Газовые:							
ЛГ-126	Гелий — неон	0,6328 1,1500 3,3900	Непрерывный	—	—	10	$10\cdot10^{-3}$
ОКГ-15	CO_2	10,6	»	—	—	—	10
Полупроводниковые:							
KR-2	GaAs	0,9	Импульсный	$5\cdot10^{-8}$	1 000	10×15	2 ... 4
S-SI	—	0,9	»	10^{-7}	2 000	34	200
ПКГ	—	0,85	»	10^{-7}	10 000	—	10

При таком же угле расходимости для лазера $\Phi'_{v\,к} = 10^{-3}\cdot683 = 0{,}683$ лм (коэффициент перевода 683 определен в § 1.1). Поток излучения и сила света лазера мощностью 10^{-3} Вт более чем на порядок превышает поток излучения и силу света мощной лампы накаливания.

3.2.2. Две лампы накаливания силой света $I_{v1} = 50$ кд и $I_{v2} = 225$ кд расположены на расстоянии $l = 2$ м друг от друга. Определить положение плоскости между ними, которая освещена с обеих сторон одинаково.

Решение

В соответствии с законом обратных квадратов $I_{v1}/l_1^2 = I_{v2}/l_2^2$. Из условия $l_2 = l - l_1$ найдем $I_{v1}/I_{c2} = (l_1/l - l_1)^2$; $l_1 = 0{,}64$ м; $l_2 = 1{,}36$ м.

§ 3.3. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приемники оптического излучения предназначены для преобразования энергии оптического излучения в какие-либо другие виды энергии (электрическую, тепловую и т. д.). Разработаны сотни типов приемников, отличающихся принципом дей-

ствия, конструкцией, параметрами. Укрупненная классификация приемников приведена на рис. 3.10. Сопоставление и выбор приемников производятся на основе анализа их параметров и характеристик. Согласно ГОСТ 19852—74 к основным параметрам относятся следующие.

Чувствительность $\eta_п$, определяемая как отношение изменения выходной величины к вызвавшему это изменение потоку излучения. Единицы измерения: А/Вт, А/лм, А/лк, В/Вт, В/лм, В/лк, В·м²/Вт, А·м²/Вт. В паспорте на приемник оговорены температура и тип источника, частота модуляции излучения, полоса пропускания измерительного тракта, т. е. условия, при которых измерялся данный параметр.

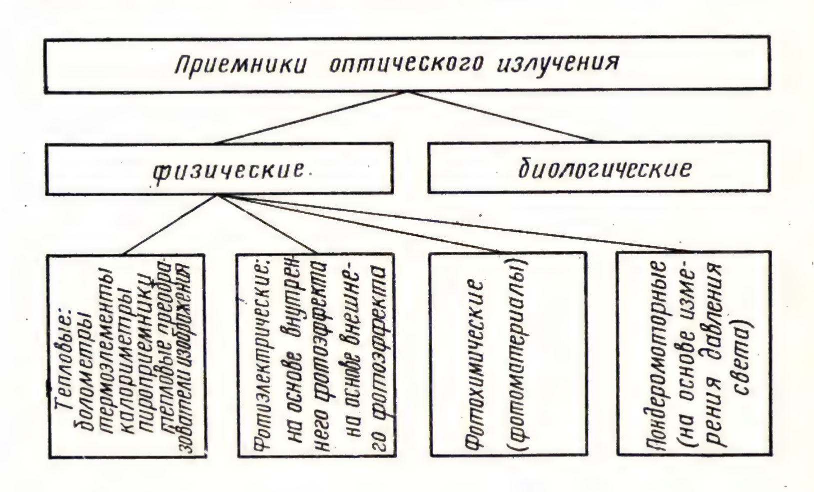


Рис. 3.10. Классификация приемников оптического излучения

Обнаружительная способность и связанные с ней величины: ток (напряжение) шума, пороговый поток, удельный пороговый поток, удельная обнаружительная способность. Поток излучения, вызывающий на выходе приемника сигнал, равный среднему квадратическому значению выходного напряжения шума в заданной полосе частот ($\sigma_{шп}$), называется пороговым, а величина, обратная ему,— обнаружительной способностью (Вт$^{-1}$). Удельным пороговым потоком $\Phi_п^*$ называют пороговый поток, отнесенный к площади чувствительного элемента ($S_п$) в единичной полосе частот (Δf): $\Phi_п^*=\Phi_п/\sqrt{\Delta f S_п}$ Величину

$$D^*=1/\Phi_п^*=\eta_п\sqrt{\Delta f S_п}/\sigma_{шп}^2$$

называют удельной обнаружительной способностью (Гц$^{1/2}\times$ $\times$см/Вт).

Собственные постоянные времени, определяющие интервалы времени нарастания (до 1—1/e от максимального значения) и спада (в e раз) напряжения выходного сигнала при облучении приемника прямоугольным импульсом. С постоянными времени связана граничная частота, при которой чувствительность приемника падает в 1,414 раз от чувствительности при немодулированном излучении.

Темновое сопротивление, емкость, динамическое сопротивление (отношение приращения напряжения к приращению тока при заданной облученности), рабочее напряжение, максимально допустимая рассеиваемая мощность, положение максимума и границы спектральной чувствительности.

Зависимость параметров приемника от каких-либо факторов называют характеристиками. Важнейшие из них — абсолютная и относительная спектральная чувствительность, вольт-амперная характеристика, зависимости параметров приемника от мощности излучения, частоты его модуляции, температуры окружающей среды и т. д.

В тепловых приемниках поглощение излучения приводит к повышению температуры чувствительного элемента. С ростом температуры увеличивается энергия электронов, определяющая их электрические свойства. Такой принцип преобразования излучения предполагает постоянство спектральной чувствительности тепловых приемников в широком диапазоне длин волн. Однако из-за селективности поглощения материала приемного элемента спектральный интервал работы детекторов этого класса ограничен.

Нагревание — инерционный процесс. Постоянная времени большинства тепловых приемников оценивается миллисекундами. Поэтому область их применения ограничена преобразованием медленно меняющихся излучений.

Термопара — простейший приемник излучения. Принцип ее действия основан на *эффекте Зеебека* — появлении эдс в цепи из двух разнородных по составу проводников при нагревании места их контакта: $\Delta U_T = \alpha_T \Delta T$, где α_T — удельная *термоэдс,* численно равная разности потенциалов при разности температур горячего и холодного контактов 1 К. Явление термоэлектричества обратимо (*эффект Пельтье*): при наличии тока в цепи из различных проводников теплота выделяется в одних контактах и поглощается в других. Происходит частичная компенсация термоэдс, обусловленной поглощенным излучением. Пороговые потоки $\Phi_п$ термопар находятся в пределах 10^{-8} ... ... 10^{-11} Вт, интегральная чувствительность колеблется от 0,5 до 30 В/Вт, постоянная времени — от 0,01 до 2 с. В общем случае высокой чувствительности соответствует большая постоянная времени и малая теплоемкость спая с поглощающим излучение

Таблица 3.6

Параметры тепловых приемников

Тип приемника	Размер чувствительного элемента, мм	Сопротивление, Ом	Интегральная чувствительность, В/Вт	Постоянная времени, с	Пороговый поток, Вт/(см · Гц$^{1/2}$)
Термоэлементы (на основе термопар):					
РТИ-24	1,5×12	100	0,5 ... 1,0	0,2 ... 1,0	(18,8 ... 127)$\cdot 10^{-10}$
РТИ-10	1,5×3	20	0,5 ... 2,0	0,2	$23,5 \cdot 10^{-10}$
ТК-3·1,5	3×1,5	4 ... 20	1 ... 4	0,07	$4,7 \cdot 10^{-10}$
ТП-0,3·3	0,3×3	36	18	0,04	$37 \cdot 10^{-10}$
Болометры:					
БКМ-4	0,9×1,8	$1,3 \cdot 10^{6}$	124	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$
НБГ-1	1,8×1,2	6 ... 8	1,5	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-9}
НБГ-2	1,8×1,2	6 ... 8	0,5	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-9}
БН-1	1×0,3	200	50 ... 100	0,1	$5 \cdot 10^{-9}$
Пироэлектрические приемники:					
БП2-1	0,78 мм²	—	50	—	$0,22 \cdot 10^{-6}$
МГ-30	1×1	—	⩾1000	—	$2 \cdot 10^{-9}$
МПЭП-25 (25 элементов)	10×10	—	10	—	$5 \cdot 10^{-6}$
МПЭП-100 (1000 элементов)	10×10	—	8	—	$6 \cdot 10^{-6}$

покрытием. Общее представление о параметрах термопар дает табл. 3.6.

Болометр — тепловой приемник, принцип действия которого основан на изменении сопротивления полупроводника или металла при изменении температуры под действием падающего излучения в соответствии с выражениями

$$\Delta R = R_0 \exp\left(\frac{F_n}{T} - \frac{F_n}{T_0}\right)\left(-\frac{F_n}{T^2}\right)\Delta T; \quad \Delta R = R_0 \alpha'_T \Delta T,$$

где R_0 — сопротивление при температуре T_0; α'_T — температурный коэффициент; $F_n = 3000$ К. Типичный болометр состоит из двух одинаковых чувствительных элементов. Один из них называют рабочим, он используется для преобразования излучения, другой — компенсационным, он экранирован от падающего излучения. Включение этих элементов в плечи моста позволяет избежать его разбаланса при колебаниях температуры окружающей среды. Спектральный диапазон чувствительности $\Delta\lambda$ болометров в основном определяется спектральной характеристикой пропускания входного окна: $\Delta\lambda = 0{,}3 \dots 25$ мкм для окна из кристалла KBr, $\Delta\lambda = 2 \dots 25$ мкм для окна из радиокерамики и т. д. В табл. 3.6 приведены параметры некоторых болометров отечественного производства.

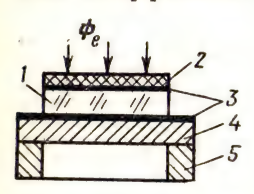


Рис. 3.11. Чувствительный элемент пироприемника:

1 — кристалл; *2* — поглощающее покрытие; *3* — электроды; *4* — изолирующая пленка; *5* — опорное кольцо

Пироэлектрические приемники — сравнительно новый класс неселективных детекторов излучения. Принцип действия этих приемников основан на зависимости спонтанной поляризации пирокристалла от температуры. В свою очередь, изменение спонтанной поляризации приводит к изменению разности потенциалов между поверхностями кристалла: $\Delta U_п \simeq p_{пэ} d_к \Delta T/\varepsilon_а$, где $p_{пэ}$ — пироэлектрический коэффициент; $d_к$ — толщина кристалла; $\varepsilon_а$ — диэлектрическая проницаемость материала. Различают одноэлементные и многоэлементные пироэлектрические приемники, а также пироконы. Чувствительный элемент одноэлементного приемника (рис. 3.11) представляет пластинку площадью 1 ... 20 мм^2 и толщиной 50 ... 150 мкм. Металлические электроды напыляются в вакууме и имеют толщину 0,1 мкм. На облучаемый электрод напыляется поглощающее излучение покрытие. Многоэлементный приемник содержит 25 и более чувствительных элементов с зазором 0,05 мм между ними. Каждый из них имеет свой предварительный усилитель. От внешней среды элементы защищены плоским окном из германия.

Конструкция *пирокона* соответствует конструкции передающей телевизионной трубки — *видикона.* В качестве мишени используется пироэлектрический материал (кристаллы титаната бария $BaTiO_3$ с примесями, триглицин сульфата $(NH_2CH_2COOH)_3H_2SO_4$, ниобат лития $LiNbO_3$ и др.). Распределение потенциала по мишени после ее облучения считывается сфокусированным электронным пучком. Поскольку потенциал $\Delta U_п$ определяется изменением температуры в каждой точке мишени ΔT, для воспроизведения стационарной тепловой картины мишень должна работать в режиме периодического освещения, создаваемого, например, с помощью оптического затвора. Это необходимо и для работы других пироприемников.

Находят применение *жидкие кристаллы,* среди которых наибольшее распространение получили холестерические кристаллы. Они имеют структуру в виде закрученных спиралей, оси которых расположены на расстоянии d. Термооптический эффект в жидких кристаллах проявляется через зависимость шага d от температуры T, за счет чего изменяется окраска кристалла. Параметр $\delta T(\delta M_e)$ определяет термочувствительность приемника — возможность отличить два участка, различающиеся температурой δT по изменению цветности δM_e в отраженном свете, параметр Δl — диапазон работы преобразователя. Разработаны кристаллы, для которых $\Delta T < 1°C$, что позволяет выделять участки, температура которых отличается на сотые доли градуса.

Промышленность выпускает термоиндикаторные пленки в виде полимерного слоя, в который введены микровключения жидких кристаллов. Толщина пленок колеблется от 20 до 40 мкм, максимальный размер составляет 0,3×0,3 м². В качестве примера приведем параметры композиции полиуретан — ХЖК: $\Delta T = 0 \ldots 120°C$; $\delta M_e = 10^{-4}$ Вт·см$^{-2}$; пространственное разрешение до 5 мм$^{-1}$, область использования — визуализация инфракрасных и СВЧ-полей [18].

Приемники на основе внутреннего фотоэффекта играют доминирующую роль в инфракрасной технике. *Внутренний фотоэффект* — это передача энергии квантов излучения электронам вещества с изменением их энергетического состояния. Такой процесс рассматривался в § 3.2.

Среди приемников, работа которых основана на явлении внутреннего фотоэффекта, различают фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры; многоцветные, координатные и развертывающие приемники.

Фоторезисторы изменяют свою электропроводимость под действием излучения. Они изготавливаются из полупроводников с собственной и примесной фотопроводимостью, а также на основе твердых растворов и чувствительны к излучениям в диапазоне 0,4 ... 40 мкм. Конструктивно неохлаждаемые фоторезисторы представляют тонкий полупроводниковый слой на стеклянной или керамической подложке с электродами (нанесенными испарением в вакууме) в виде пленок из золота, платины или серебра. Слой покрывают лаком и помещают в герметический корпус. Для охлаждения чувствительного элемента часто используют *сосуд Дьюара* — два стеклянных стакана с

отражающим покрытием, вставленные один в другой и заваренные по торцу. В промежутке между стаканами создается вакуум, а во внутренний объем помещают хладоагент — сжиженный или отвержденный газ. Находят применение также систе-

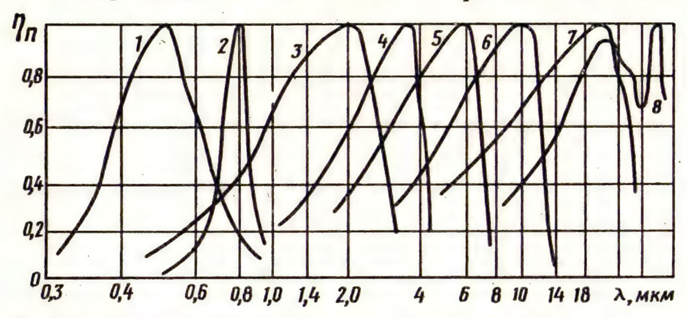


Рис. 3.12. Спектральные характеристики чувствительности некоторых фоторезисторов:

1 — CdS (295 K); *2* — CdSe (295 K); *3* — PbS (295 K); *4* — PbSe (295 K); *5* — InSb (295 K); *6* — Ge : Hg (30 K); *7* — Ge : Cu (4,2 K); *8* — Ge : Zn (4,2 K)

мы, основанные на поглощении теплоты резко расширяющимся газом, термоэлектрические холодильники, работа которых основана на эффекте Пельтье, и т. д.

Представление о спектральной чувствительности фоторезисторов дает рис. 3.12.

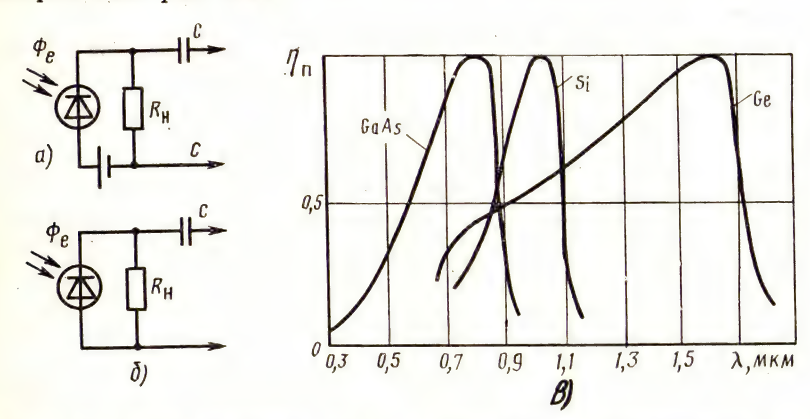


Рис. 3.13. Схемы включения (*а*, *б*) и спектральные характеристики (*в*) фотодиода

Фотодиоды — также основаны на внутреннем фотоэффекте и используют одностороннюю проводимость *p-n*-перехода. При освещении перехода в нем образуются электронно-дырочные пары, что приводит к появлению эдс (фотогальванический режим), а при подаче напряжения на переход изменяется обрат-

ный ток в нем (фотодиодный режим). При фотогальваническом режиме не требуется источника питания (рис. 3.13, *б*), внутреннее сопротивление фотодиода мало, собственные шумы сравнительно небольшие. Из-за значительного внутреннего сопротивления фотодиодный режим включения (рис. 3.13, *а*) находит применение в цепях с большим сопротивлением нагрузки. Схемы включения и примеры спектральных характеристик фотодиодов приведены на рис. 3.13. Среди модификаций фотодиодов следует отметить поверхностно-барьерные приемники

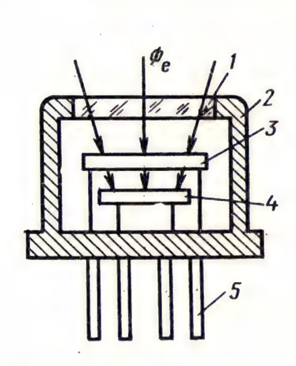


Рис. 3.14. Конструкция двухцветного приемника:

1 — входное окно; *2* — корпус; *3* — фотоприемник на базе PbSe; *4* — фотоприемник на базе PbS; *5* — выводы

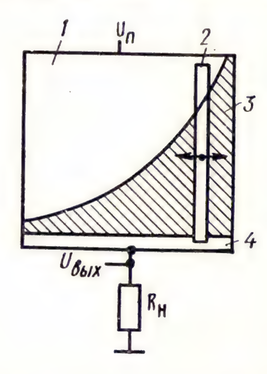


Рис. 3.15. К пояснению принципа действия координатных фоторезисторов:

1, *4* — электроды; *2* — подвижной световой зонд; *3* — слой фотопроводящего материала

(*p-n*-переход расположен на поверхности полупроводника), отличающиеся от обычных малой плотностью темнового тока ($\sim 10^{-7}$ А/см^2); детекторы типа *p-i-n* (собственный полупроводник между *p-* и *n*-областями), постоянная времени которых порядка 10^{-9} с; лавинные фотодиоды, усиливающие фототок за счет ударной ионизации *p-n*-перехода (в $10^2 \dots 10^5$ раз). Принцип усиления фототока реализован также в фототранзисторах и фототиристорах.

Многоцветные (спектральные), координатные и развертывающие *приемники* позволяют получить информацию о распределении энергии в спектре излучения или освещенности в пространстве изображений. Многоцветные приемники одновременно регистрируют излучение в нескольких спектральных диапазонах в одном и том же оптическом канале с одним и тем же полем зрения. Конструкция простейшего двухцветного приемника показана на рис. 3.14. Верхний фотоприемник (PbSe) поглощает излучение в диапазоне 0,3 ... 1,15 мкм,

остальное пропускает, нижний (PbS) — чувствителен к излучению до 5,2 мкм или с учетом верхнего элемента реагирует на излучение с длинами волн от 1,15 до 5,2 мкм. В настоящее время описаны четырехканальные приемники.

В координатных приемниках выходной сигнал определяется координатами светового пятна на фоточувствительной поверхности (рис. 3.15). Нанесенный на электрод *1* фоточувствительный слой *3* имеет большое темновое сопротивление. В зависимости от положения светового зонда (сформированного в виде узкой полоски *2* света) освещается разная по площади часть фотослоя. Ток в нагрузочном резисторе $R_н$ пропорционален освещенной части фотослоя и функционально связан с координатами светового пятна. Такие приемники используют для контроля механических перемещений.

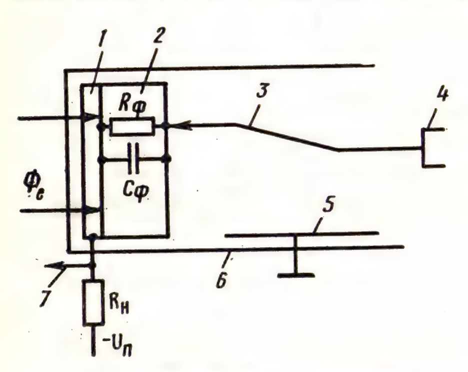


Рис. 3.16. Схема видикона:
1 — прозрачный электрод; *2* — слой фотопроводника; *3* — электронный луч; *4* — электронный прожектор; *5* — фокусирующе-отклоняющая система; *6* — баллон; *7* — электрический сигнал

Развертывающие приемники предназначены для преобразования изображения во временну́ю последовательность электрических сигналов. К ним относят телевизионную передающую трубку видикон, сканисторы, приборы с зарядовой связью (ПЗС), приборы с зарядовой инжекцией, а также гибридные мозаичные приемники.

Видикон — передающая трубка с фотопроводящей мишенью (рис. 3.16). Излучение, проходя через прозрачный электрод *1*, меняет проводимость фотопроводника *2*. Коммутирующий электронный луч *3* формируется электронным прожектором *4* и фокусирующе-отклоняющей системой *5*. Эквивалентную электрическую схему мишени можно представить в виде большого числа элементарных емкостей $C_ф$, шунтируемых сопротивлениями $R_ф$, параметры которых зависят от освещенности. При коммутации правая сторона каждого элемента мишени приобретает постоянный потенциал. Между коммутациями емкости разряжаются через сопротивления, формируя потенциальный рельеф, соответствующий распределению лучистого потока. При следующей коммутации происходит переразряд конденсаторов до равновесного потенциала. Токи переразряда, проходя через нагрузочный резистор $R_н$, образуют на нем сигнал, пропорциональный проводимости фотопроводника. Выпускаемые промышленностью видиконы в основном работают при освещенностях

2 ... 10 лк в диапазоне 0,35 ... 0,8 мкм и обеспечивают число строк в кадре от 300 до 1200.

Приборы с зарядовой связью получают все более широкое распространение. Они представляют МДП-структуру, в которой металлические электроды образуют регулярную систему (рис. 3.17, *а*). Электроды напыляются на диэлектрическую пленку, в свою очередь нанесенную на полупроводниковую пластинку. Размеры электродов несколько микрометров, расстояние между ними 1 мкм. При подаче на один из электродов отрицательного напряжения на границе диэлектрик — полупроводник (под электродом) образуется область, обедненная основными носителями из-за ухода электронов в глубь полупроводника *n*-типа. Эта область представляет потенциальную яму для неосновных носителей — дырок.

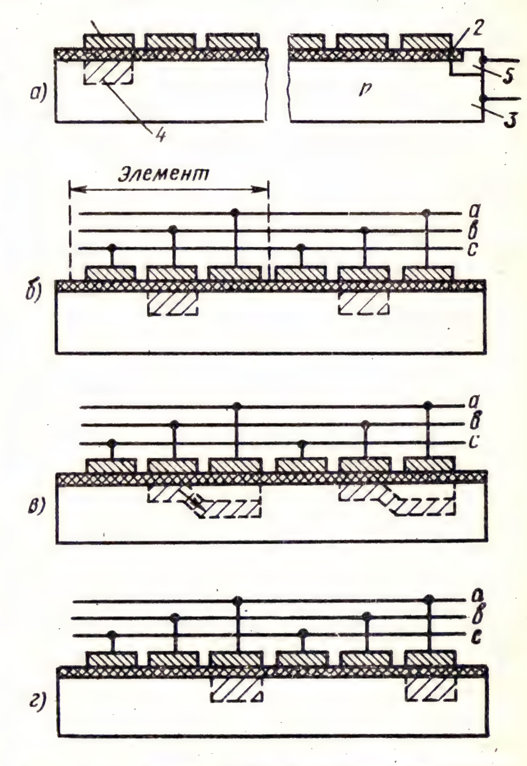


Рис. 3.17. Схема ПЗС и процесс переноса зарядов:

1 — электроды; *2* — диэлектрическая пластинка из SiO_2; *3* — кремниевая пластинка; *4* — потенциальная яма; *5* — полупроводник *p*-типа

Если через электрод, прозрачный для рабочего диапазона излучений, осветить потенциальную яму, в ней образуются дырки, число которых пропорционально плотности потока излучения. Под действием отрицательного напряжения дырки притягиваются к границе раздела диэлектрик — проводник и локализуются в узком поверхностном слое. Аналогичная картина наблюдается под каждым электродом. Таким образом, линейка ПЗС переводит распределение освещенности в строке изображения в так называемые зарядовые пакеты носителей, а также хранит зарядовую информацию.

Вывод зарядов из линейки и преобразование ее в видеосигнал осуществляются через обратносмещенный *p-n*-переход (об-

ласти *3—5* справа на рис. 3.17, *а*) путем подачи специально сформированной последовательности импульсов напряжения на электроды. Принцип получения видеосигнала состоит в следующем. Если под одним из электродов сформирован пакет зарядов из дырок, то при подаче более отрицательного напряжения на соседний электрод пакет перемещается под него. Последовательная подача отрицательных напряжений с увеличивающейся амплитудой на электроды приводит к сдвигу пакета вдоль линейки.

Таблица 3.7

Параметры матриц на основе ПЗС

Параметр матрицы	Значение параметра			
Число элементов, шт.	496×475	244×190	640×480	640×480
Чувствительность, А/Вт	0,08	0,037	0,1	0,1
Площадь светочувствительной площадки, мм²	123	25	123	123
Площадь элемента изображения, мкм²	530	540	400	400
Темновой сигнал, число электронов	10^4	10^3	$6{,}5\cdot10^3$	65
Температура, °С	24	24		—40

Практическая реализация рассмотренного принципа поясняется на рис. 3.17, *б — г*. Три соседних электрода формируют элемент изображения. В начальный момент времени отрицательный потенциал подается на шину *b* и под средними электродами элементов при воздействии лучистого потока от объекта происходит накопление зарядов в потенциальных ямах. В следующий временно́й интервал отрицательный потенциал подается только на шину *a* и накопленные заряды перемещаются вправо под электроды, связанные с шиной *a*. Такт завершается подачей напряжения на шину *c* и перемещением заряда вправо из одного элемента линейки в соседний. Последовательное повторение тактов приводит к выводу информации из линейки через *p-n*-переход (рис. 3.17, *а*).

Недостаток рассмотренного алгоритма считывания — наличие паразитной засветки элементов ПЗС лучистым потоком от изображения во время считывания. Для устранения этого явления лучистый поток в момент считывания перекрывают экраном. Существует несколько вариантов технических решений, позволяющих реализовать операцию экранирования потока [27]. ПЗС выпускают в виде линеек и матриц (табл. 3.7).

Приборы с зарядовой инжекцией (ПЗИ) отличаются от ПЗС способом считывания сигнального заряда. Считывание

происходит в той же приемной ячейке, в которой сигнал был сформирован. Кроме того, ПЗИ не содержат дополнительных элементов для переноса зарядов. Снятие зарядов осуществляется путем их инжекции в полупроводниковую подложку. Благодаря такой организации с помощью ПЗИ можно считывать полученное изображение без разрушения информации.

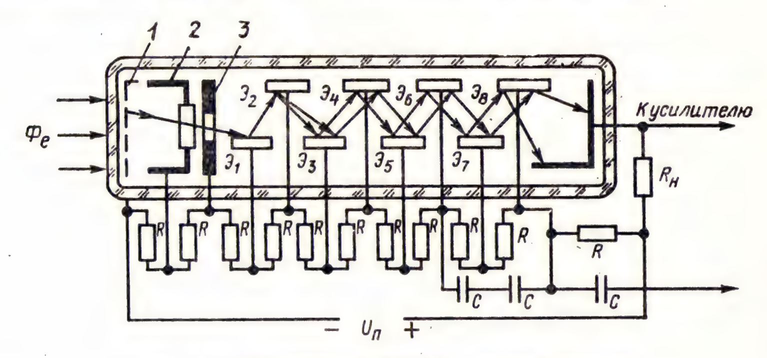


Рис. 3.18. Устройство ФЭУ со схемой питания

Приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта представляют два изолированных от внешней среды электрода, на которые подается электрическое напряжение. Под действием падающего на один из электродов (фотокатод) излучения он эмиттирует электроны, которые, ускоряясь в электрическом поле, достигают другого электрода (анода). Во внешней цепи появляется электрический ток, пропорциональный потоку излучения: $i_ф = \eta_п \Phi_e$. Согласно закону Эйнштейна кинетическая энергия вышедшего из фотокатода электрона равна разности энергии фотона и работы выхода: $mv^2/2 = h\nu - W_ф$. Из условия $h\nu = W_ф$ находится граничная длина волны, начиная с которой возможен фотоэффект: $\lambda_{min} = 1{,}242/W_ф$.

Электровакуумные фотоэлементы — наиболее простой тип приемников данного класса, в которых в откачанный баллон помещены два электрода.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) отличается от электровакуумного фотоэлемента наличием вторично-электронного умножителя, фокусирующей электронно-оптической системы и диафрагмы (рис. 3.18). Первичные электроны с фотокатода *1* ускоряются электрическим полем, фокусируются системой *2* и через диафрагму *3* попадают на первый динод $Э_1$, вызывая эмиссию вторичных электронов из него. Увеличенный поток электронов с первого динода ускоряется электрическим полем и направляется на второй динод и т. д. Электрическое ускоряющее поле создается делителем из резисторов *R* и конденсаторов *C*. Конденсаторы устанавливаются в последних каскадах

делителя и служат для сглаживания пульсаций напряжения, обусловленных протеканием сравнительно большого тока в примыкающих к аноду динодах ФЭУ. Такой механизм «размножения» электронов характеризуется коэффициентом усиления порядка 10^7, что достаточно для регистрации сигнала на

Таблица 3.8

Параметры ФЭУ

Параметр	ФЭУ-31А	ФЭУ-64	ФЭУ-79
Область спектральной чувствительности, мкм	0,30 ... 0,60	0,30 ... 0,60	0,30 ... 0,82
Диаметр катода, мм	18	5	6
Анодная чувствительность, А/лм	10	1000	1000
Темновой ток, А	$5\cdot10^{-7}$	$5\cdot10^{-8}$	$4\cdot10^{-8}$

выходе от одного упавшего на фотокатод кванта света. Большой коэффициент усиления, малая инерционность (до 1 нс), низкий уровень собственных шумов предопределили области использования ФЭУ: ядерная спектроскопия, сцинтилляционная спектрометрия, фотометрия быстроизменяющихся малых потоков излучения. Параметры приемников этого типа приведены в табл. 3.8.

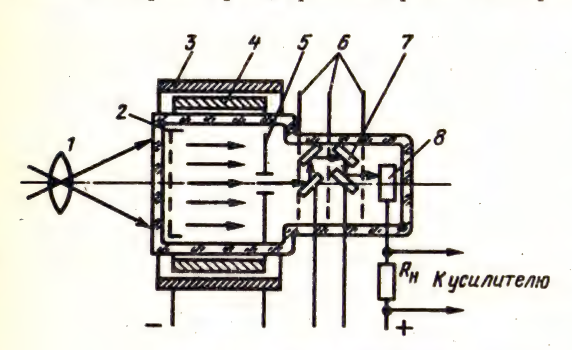


Рис. 3.19. Схема диссектора:

1 — объектив; *2* — фотокатод; *3* — отклоняющие катушки; *4* — фокусирующие катушки; *5* — диафрагма; *6* — сетки; *7* — динодная система; *8* — анод

Диссектор — приемник, выполненный в виде передающей электронно-лучевой трубки, в которой электронное изображение, сформированное фотокатодом, фокусируется и отклоняется относительно неподвижного отверстия или щели (рис. 3.19). Изображение предметов на фотокатоде *2* строится объективом *1*. Каждая точка фотокатода эмиттирует электроны, число которых пропорционально освещенности. Фокусирующая катушка *4* переносит электронное изображение в плоскость диафрагмы *5*. Часть электронов, проходя через отверстие диафрагмы, умножается на динодах *7* и затем попадает на анод *8*. Сетки *6* обеспечивают нужную траекторию электронов. Под действием отклоняющих катушек *3*

электронное изображение перемещается относительно отверстия *5*. В результате освещенность каждой точки фотокатода преобразуется последовательно в электрические потенциалы на резисторе нагрузки $R_н$. Включение диссектора в телевизионный канал позволяет восстановить исходное световое изображение.

Таблица 3.9

Параметры диссекторов

Параметр	ЛИ604К	ЛИ605-1	ЛИ607	ЛИ608
Размер фотокатода (отверстия диафрагмы), мм	⌀25 (0,4×0,4)	⌀25 (⌀ 0,1)	6×6 (0,2×0,2)	⌀25 (⌀ 0,2)
Область спектральной чувствительности, мкм	0,35 ... 0,70	0,35 ... 0,80	0,24 ... 0,80	—
Разрешающая способность в центре/на краю, лин./мм	125/100	300/250	125/100	150/100
Темновой ток, А	$5\cdot10^{-8}$	$5\cdot10^{-7}$	$5\cdot10^{-8}$	$5\cdot10^{-7}$
Отношение сигнал/шум при $\Delta f=18$ кГц (E, лк)	18(15)	13(10)	25 (10)	45 (50)

Параметры ряда отечественных диссекторов приведены в табл. 3.9. Они находят применение в системах контроля для преобразования изображений с большим перепадом освещенности.

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) предназначены для преобразования оптического или рентгеновского изображения в видимое. Конструктивно ЭОП представляет стеклянный баллон, на одну стенку которого нанесен полупрозрачный фотокатод, на противоположную — люминофор (рис. 3.20). Из баллона выкачан воздух. На электроды подается напряжение до 15 кВ. Столь высокое напряжение стягивает вылетающие из каждой точки фотокатода электроны в соответствующие точки на экране. Разрешающая способность ЭОП — 5—6 пар лин./мм. Применение фокусирующих систем и использование в качестве материала экрана мелкозернистых слоев специальных люминофоров позволяют увеличить разрешающую способность более чем на порядок. Отечественная промышленность выпускает

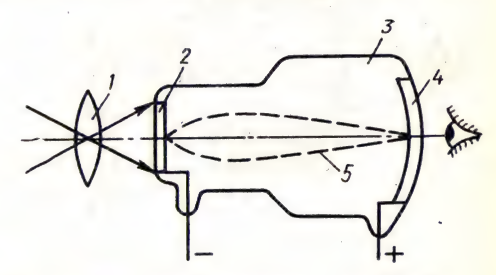


Рис. 3.20. Схематическое устройство ЭОП:

1 — объектив; *2* — фотокатод; *3* — колба; *4* — люминесцентный слой; *5* — электронный пучок

ЭОПы типов ПИМ-3Ш, УМИ-92ШВ, УМИ-93ШВ, УМИ-95Ш, ЭПИ-1И и др. с пространственным разрешением до 50 лин./мм.

Фотохимические приемники излучения используются в голографии, эмиссионном спектральном анализе, спектроскопии, радиографии. Для этого класса приемников разработана своя система параметров и характеристик.

Характеристическая кривая представляет зависимость оптической плотности от десятичного логарифма экспозиции. Она позволяет определить рабочий участок фотоматериала, на котором приращение оптической плотности пропорционально увеличению логарифма экспозиции. Тангенс угла наклона этой кривой называют коэффициентом контрастности, а длину проекции прямолинейного участка на ось абсцисс — фотографической широтой.

Частотно-контрастная характеристика фотослоя характеризует способность фотоприемника передавать детали различного размера и их контраст, а спектральная характеристика определяет диапазон длин волн, в которым чувствителен фотослой.

Фотопленки и фотопластинки — это подложки, на которые наносят желатиновую эмульсию с распределенными галогенидами серебра. Галогенид серебра чувствителен к излучениям с длинами волн от 0,01 до 500 нм, эмульсия сильно поглощает ультрафиолетовое излучение. Чтобы сделать фотоматериал чувствительным в длинноволновой области спектра, его сенсибилизируют (добавляют красители). Материалы, сенсибилизированные к зеленым и желтым лучам, называют ортохроматическими, к зеленым, желтым, оранжевым и красным лучам — панхроматическими, к инфракрасным лучам — инфрахроматическими. В голографии используют фотопластинки типов ВР-Л, ВР-Э, в спектроскопии — И740А, И780А, И-840А, И-880А, И-920А, для фотографирования с высокой разрешающей способностью — «Микрат-200» (200 лин./мм), «Микрат-900» (900 лин./мм), ФПГ-В (1000 лин./мм), а также фототехнические пленки ФТ-М, ФТ-10, ФТ-11 и др.

Глаз человека считается уникальным приемником излучения. Как известно, сетчатка глаза состоит из колбочек и палочек. Колбочки имеют малую световую чувствительность, отличаются большой разрешающей способностью и способны различать цвета. Палочки не различают цвета, характеризуются большой чувствительностью и малой разрешающей способностью. Центральная часть сетчатки содержит только колбочки, периферия — колбочки и палочки.

Диапазон яркостей, воспринимаемых глазом, можно разбить на области ночного ($3 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-4}$ кд/м^2), сумеречного ($10^{-4} \dots 3$ кд/м^2) и дневного ($3 \dots 3 \cdot 10^4$ кд/м^2) зрения. Первая соответствует палочковому, вторая — палочко-колбочковому,

третья — центральному (колбочковому) зрению. Контрастная чувствительность глаза (способность регистрировать отличающиеся по яркости детали изображения) по разным оценкам лежит в пределах $(\Delta L_v/L_v) = 0{,}02 \dots 0{,}05$.

Поле зрения глаза, в котором качество видения считается удовлетворительным, составляет 30° по углу места и 40° по азимуту. Максимальная острота зрения (пространственная разрешающая способность) составляет одну обратную угловую минуту (1′=0,29 мрад). В указанном поле зрения может быть выделено более миллиона отдельных элементов изображения.

С увеличением угловых размеров воспринимаемого объекта чувствительность глаза $\eta_п$ растет. Эта зависимость получила название частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) или реакции на изображение пространственной синусоидальной волны. Типичная ЧКХ представлена на рис. 3.21. Угловое разрешение колбочки 0,29 мрад. Если объект имеет большие размеры, глаз суммирует сигналы от всех возбуждаемых им колбочек. Растет отношение сигнал/помеха пропорционально корню квадратному от числа возбужденных колбочек. Этот эффект наблюдается до тех пор, пока диаметр объекта не достигнет примерно 1,1 мрад. Начиная с частоты $\lambda_п = (1/11)$ мрад$^{-1}$ ЧКХ начинает спадать в сторону низких пространственных частот.

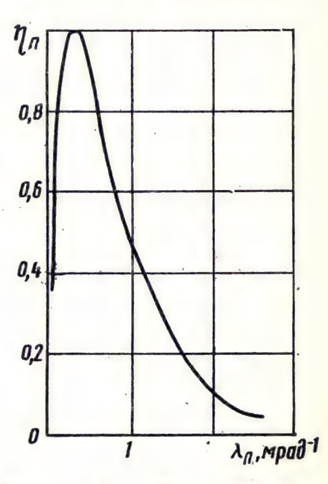


Рис. 3.21. Частотно-контрастная характеристика глаза

При низкой частоте предъявления изображений глаз ощущает мигания, которые становятся неразличимыми на частоте 50 Гц. Наибольшая чувствительность к миганиям наблюдается на частоте 10 Гц, что объясняется инерционностью глаза (постоянная времени $t_г = 0{,}1 \dots 0{,}2$ с).

Процесс обнаружения объекта начинается со случайного поиска. В течение 1 с глаз совершает 3 ... 5 скачков длительностью 0,04 с на угол 6 ... 8° при поле обзора 30° и на угол 2° при поле обзора 9°. После очередного скачка происходит фиксация взгляда примерно в течение 0,3 с, во время которой глаз совершает микродвижения: тремор, дрейф, микросаккады. Тремор характеризуется частотой около 100 Гц и амплитудой около 1. Плавные смещения взора (до 1,3°) определяют дрейф; резкие скачки в пределах центральной ямки называют микросаккадами. Если в зоне фиксации объект не обнаружен, происходит следующий скачок. Вероятность обнаружения одиночного объекта на однородном фоне в зависимости от длительности поиска описывается формулой Травниковой:

$$P_{\text{Т}} = 1 - \exp\left(-\frac{C_{\text{Б}} K_0^2 \gamma_0^3 L_0^{0,3} t}{(2\beta)^2}\right),$$

где $C_{\text{Б}}$ — 16 град^2(кд/м^2)$^{-0,3}$(угл. мин)$^{-3}$с$^{-1}$; $K_0 = \Delta L/L_v$ — яркостный контраст объекта на фоне яркостью L_v; γ_0 — угловой размер объекта; t — время поиска; 2β — угловой диаметр поля обзора.

Вероятность обнаружения движущихся объектов

$$P_{\text{дТ}} = 1 - \exp\left(-\frac{C_{\text{д}} K_0^2 \gamma_0^3 L_v^{0.3}}{\omega^2}\right),$$

где $C_д=4$ (угл. мин)$^{-3}\cdot$(кд/м^2)$^{-0,3}\cdot$град$^2\cdot$с$^{-2}$; $\omega=2\beta/t$ — угловая скорость движения объекта.

При использовании оптических приборов для наблюдения поля обзора необходимо пересчитать входящие в выражения величины для пространства изображений:

$$\gamma_0' = \Gamma\gamma_0;\ K_0' = K_0/(1+q_p);\ L_v' = \tau L_v;\ 2\beta' = \Gamma\cdot 2\beta,$$

где Г — увеличение оптики; $q_p=0{,}05 \ldots 0{,}1$ — коэффициент светорассеяния; τ — коэффициент светопропускания оптики.

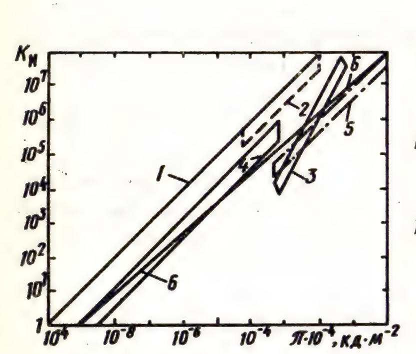


Рис. 3.22. К сопоставлению приемников в видимом диапазоне длин волн:

1 — идеальный приемник; 2 — гипотетическая достижимая характеристика видикона; 3, 4 — образцы фотоэлектрических приемников; 5 — фотохимические приемники; 6 — глаз человека; $K_и$ — коэффициент, характеризующий качество изображения

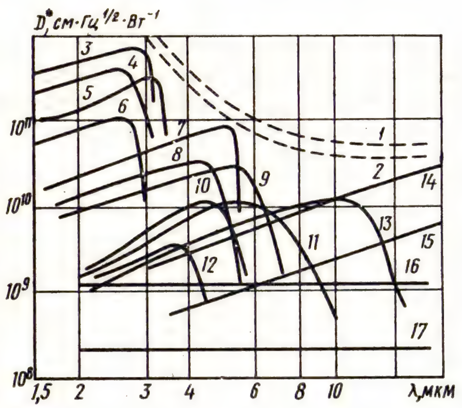


Рис. 3.23. Спектральная чувствительность приемников в инфракрасном диапазоне длин волн:

1, 2 — теоретический предел для фотодиодов и фоторезисторов соответственно; 3 — InAs (77 К); 4 — PbS (195 К); 5 — InAs (195 К); 6 — PbS (295 К); 7 — InSb (77 К, ФД); 8 — PbSe (195 К); 9 — PbSe (77 К); 10 — PbIe (77 К); 11 — GeAu (77 К); 12 — PbSe (295 К); 13 — Ge : Hg (30 К); 14 — Ge : Cu (4,2 К); 15 — Ge : Hg (4,2 К); 16 — термоэлемент; 17 — болометр

Если на наблюдаемом изображении заметны помехи, для ориентировочной оценки вероятности обнаружения объекта рекомендуется пользоваться формулой $P_{об}=P_т P_л$, где $P_л=1-\exp[-0{,}15(q_в-1)^2]$, $q_в$ — воспринимаемое оператором отношение сигнал/помеха. При использовании последней формулы применительно к телевизионным изображениям необходимо позаботиться о том, чтобы число строк на высоту кадра превышало 232, а на объект обнаружения приходилось не менее четырех строк.

Характеристики зрительной системы должны быть учтены при проектировании систем контроля, в которых функции принятия решений и управления осуществляет человек.

При проектировании конкретной системы контроля разработчик неизбежно решает вопрос о выборе подходящего приемника. Исходные сведения можно получить, воспользовавшись рис. 3.22 и 3.23, которые отражают результаты сопоставления

приемников в видимой и инфракрасной областях оптического спектра. Полезным также оказывается знание формул связи световых величин с энергетическими, по которым осуществляют переход от параметров одного (паспортного) источника к параметрам, соответствующим другому произвольному источнику. Формула связи имеет вид (см. § 1.1):

$$\Phi_v = 680 \int_{0,38}^{0,78} \Phi_e(\lambda)\, \eta_\lambda d\lambda = 680 \Phi_{эф}.$$

При усложненном характере функции $\Phi_e(\lambda)$ пересчет по приведенной формуле проводят графоаналитическим способом. Величину $\Phi_{эф}$ называют эффективным потоком излучения для глаза от данного источника, а отношение $\Phi_v : \Phi_e = 680\Phi_{эф} : \int_0^\infty \Phi_e(\lambda)\, d\lambda = 680\eta_г$ – «коэффициентом полезного действия глаза», приводимым в паспортных данных для различных источников. Перевод из энергетической системы в световую любой величины осуществляют по формулам: $\eta_e = \eta_v 680 \eta_г$; $\Phi_v = 680 \Phi_e \eta_г$; $L_v = 680 L_e \eta_г$; $E_v = 680 E_e \eta_г$.

Задачи

3.3.1. Пересчитать интегральную чувствительность и пороговый поток фотодиода, выраженные в световых величинах, в энергетические, если известно: $\eta_v = 20$ мА/лм; $\Phi_{п\ v} = 20 \cdot 10^9$ лм; $680\ \eta_г = 20$ лм/Вт.

Решение

Находим: $\eta_e = \eta_v \cdot 680 \eta_г = 20 \cdot 20 = 400$ мА/лм; $\Phi_{п\ e} = \Phi_{п\ v}/(680\eta_г) = 2 \cdot 10^{-9}/20 = 10^{-10}$ Вт.

В случае произвольного источника для пересчета параметров приемника, заданных по паспортному источнику, необходимо знать коэффициенты использования потоков излучения (η_1, η_2) каждого источника этим приемником. Тогда интегральная чувствительность $\eta_{e2} = \eta_{e1}\eta_2/\eta_1$, пороговый поток $\Phi_{e2} = \Phi_{e1}\eta_1/\eta_2$; обнаружительная способность $D_{e2} = D_{e1}\eta_2/\eta_1$.

3.3.2. Определить время обнаружения объекта прямоугольной формы размерами 1,2×2,4 мм, наблюдаемого на экране круглой формы (диаметр экрана 650 мм) с расстояния 1 м. Яркость экрана 30 кд/м². Контраст объекта с фоном $K = -0{,}15$. Поиск ведется бинокулярно. Вероятность обнаружения $P_т = 0{,}8$, шумы незаметны для глаза.

Решение

Расчет произведем по формуле Травниковой, преобразованной к виду

$$t = \frac{\lg(1 - P_т)^{-1} (2\beta)^2}{C_Б K_0^2 \gamma_0^3 L_v^{0,3} \lg e}.$$

По известным линейным размерам объекта и расстоянию, с которого ведется наблюдение, находим угловые размеры объекта: $\gamma_{01} = 3440 \cdot 1{,}2 \times 10^{-3}$ м/1 м $= 4{,}1$ угл. мин; $\gamma_{02} = 3440 \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-3}$ м/1 м $= 8{,}2$ угл. мин (коэффи-

циент 3440 вводится для получения результата в угловых минутах). Определяем γ_0 как угловой размер стороны равновеликого квадрата: $\gamma_0=5{,}8$.

Угловые размеры поля поиска находятся из выражения $\operatorname{tg}\beta=650$ мм/(2$\times$$\times$100 мм)$=0{,}325$. Следовательно, $\beta=18°$.

Подставив найденные значения, а также заданные по условиям задачи в формулу для t, получим $t=10{,}5$ с.

3.3.3. Обнаружить дефект на рентгенограмме. Изменится ли время обнаружения, если поиск ведется с использованием увеличительной лупы?

Решение

В данном случае вероятности обнаружения при работе с лупой и без нее следует принять равными. Тогда, используя формулу Травниковой, получаем

$$\exp\left(-\frac{C_Б K_0^2 \gamma_0^3 L_v^{0.3} t}{(2\beta)^2}\right) \Big/ \exp\left(-\frac{C_Б K_0^2 (1+q_р)^{-2} (\Gamma\gamma_0)^3 (\tau_0 L_0)^{0.3} t_л}{(2\Gamma\beta)^2}\right)=1,$$

или, принимая коэффициент светорассеяния $q_р=0{,}05$, а коэффициент пропускания оптики $\tau_0=0{,}9$,

$$\exp\left[-\frac{C_Б K_0^2 \gamma_0^3 L_v^{0.3} t}{(2\beta)^2}\ (t-0{,}87 t_л \Gamma)\right]=1,$$

где Γ — увеличение оптики; $t_л$ — время обнаружения дефекта с использованием увеличительной оптики. Последнее равенство выполняется при $t=$ $=0{,}87 t_л \Gamma$, т. е. применение оптики с $\Gamma>1{,}5$* сокращает время обнаружения дефекта.

§ 3.4. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОГО И ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Помимо источников и приемников излучения оптические и тепловые системы контроля имеют дополнительные элементы, предназначенные для фокусировки и развертки изображения, передачи лучистого потока по криволинейным траекториям, выделения отдельных участков спектра излучения и т. д.

Фокусирующие элементы служат для формирования изображения в плоскости приемника и концентрации излучения в определенном телесном угле. В зависимости от рабочей длины волны материалы, используемые для изготовления фокусирующих элементов, могут различаться, принцип же действия всех элементов одинаков. Излучение ОК распространяется в полусферу, и только незначительная часть его $\Phi_e \simeq \Omega_п I_e$ перехватывается приемником излучения (рис. 3.24). Здесь $\Omega_п$ — телесный угол, соответствующий чувствительной площадке; I_e — сила излучения. Введение перед приемником объектива, фокусирующего лучи на чувствительную площадку приемника, приводит к перехвату большей части потока: $\Phi_{eоб}=I_e\Omega_{об}=$ $=\Phi_e\Omega_{об}/\Omega_п$. Значение сомножителя $\Omega_{об}/\Omega_п$ колеблется от нескольких единиц до 5000 и называется он коэффициентом уси-

ления оптической системы. На практике находят применение три типа фокусирующих элементов: линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

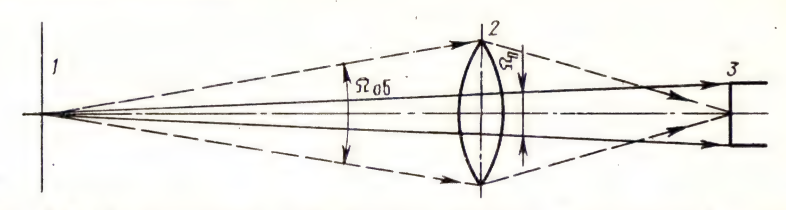


Рис. 3.24. К определению коэффициента усиления фокусирующей системы: *1* — ОК; *2* — объектив; *3* — приемник

Линзовый фокусирующий элемент в общем случае состоит из объектива и конденсора. *Зеркальные элементы* состоят из обтекателя и зеркал (рис. 3.25). Обтекатель защищает зеркала от пыли. Существует несколько вариантов взаимного расположения зеркал и приемника, являющихся аналогами клас-

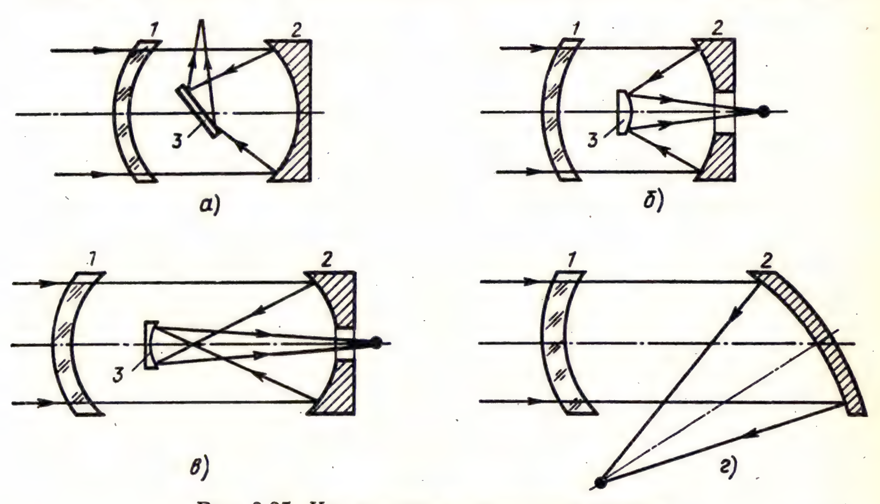


Рис. 3.25. Классические зеркальные системы:
а — Ньютона; *б* — Кассегрена; *в* — Грегори; *г* — Гершеля; *1* — обтекатель; *2* — первичное зеркало; *3* — вторичное зеркало

сических систем Ньютона, Кассегрена, Грегори, Гершеля. Расстояние между первичным и вторичным зеркалами при заданном фокусном расстоянии минимально в системе Кассегрена, состоящей из первичного параболического и вторичного гиперболического зеркал. Затенение вторичным зеркалом минимально в системе Ньютона и максимально в системе Грегори. Система Гершеля относится к несветосильной оптике и характе-

ризуется минимальной экранировкой падающего потока. Разрешающая способность зеркальных фокусирующих элементов мала (2 ... 6 мрад), а рабочий диапазон длин волн определяется входным окном — обтекателем.

Зеркально-линзовая система позволяет получить изображение более высокого качества. При относительном отверстии $(d_{об}/f_{об}) = 1:1$ удается реализовать разрешение 1 мрад при угле поля зрения 25°. Объективы такого типа рассчитаны на работу в диапазоне 0,4 ... 4 мкм. На рис. 3.26 изображен вариант схемы зеркально-линзовой телескопической системы.

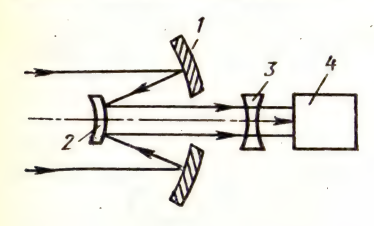


Рис. 3.26. Схема зеркально-линзовой телескопической системы:

1 — первичное зеркало (обтекатель); *2* — вторичное зеркало; *3* — двояко-вогнутая линза; *4* — приемник

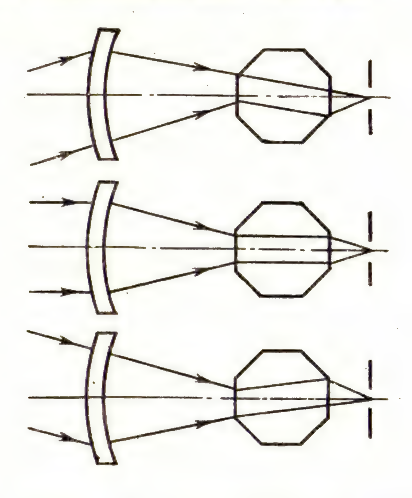


Рис. 3.27. Схема развертки изображения многогранной призмой

Сопоставление зеркальных и линзовых фокусирующих элементов позволяет сделать вывод, что зеркальные системы предпочтительны во всех случаях, когда не требуется высокого пространственного разрешения. В линзовых системах имеют место сравнительно большие потери излучения в оптических элементах, а обеспечиваемое ими пространственное разрешение максимально. Промежуточными свойствами обладают зеркально-линзовые системы [20].

Сканирующие системы предназначены для преобразования поля излучения во временну́ю последовательность электрических сигналов. В передающих телевизионных трубках эта операция осуществляется с помощью коммутации элементов фоточувствительной мишени сфокусированным электронным лучом. Перемещение луча происходит под действием магнитного поля, формируемого отклоняющими катушками, расположенными на горловине трубки. В многоэлементных приемниках с внутренним фотоэффектом сканирование реализуется путем формирования соответствующей последовательности управляющих электрических сигналов (см. § 3.3). При использовании одно-

элементных приемников применяют устройства оптико-механического сканирования: вращающиеся призмы, зеркальные цилиндрические и конические барабаны, колеблющиеся зеркала, вращающиеся клинья. На рис. 3.27 изображен вариант такого устройства с применением пропускающих призм. Показан ход лучей при фокусировке излучения, падающего под различными углами к оси оптической системы.

Устройства оптико-механического сканирования, несмотря на их очевидные недостатки, достаточно широко используются на практике. Это объясняется тем, что все элементы исследуемого изображения преобразуются в электрический сигнал одним и тем же приемником, т. е. обеспечивается постоянство

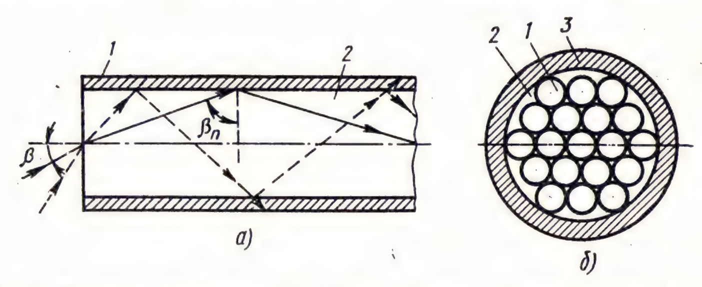


Рис. 3.28. Принцип действия (*а*) и устройство (*б*) волоконного световода: *1* — оболочка; *2* — жила; *3* — чехол

коэффициента преобразования по всему кадру. Следовательно, такая система может выступать в роли измерительного прибора. В развертывающих приемниках одинаковую чувствительность всех элементарных детекторов обеспечить затруднительно. Поэтому на их основе выпускаются индикаторы изображений. Успехи в области полупроводниковой электроники позволяют считать, что в ближайшие годы системы на базе многоэлементных приемников по параметрам будут сопоставимы с устройствами оптико-механического сканирования.

Волоконные световоды предназначены для передачи лучистого потока (изображения) по произвольным траекториям и представляют набор волокон малого диаметра (жгуты), размещенных в чехле-оболочке (рис. 3.28). Излучение, входящее в световод, многократно отражается от стенок волокна и выходит через противоположный торец. Угол наклона лучей β на входе определяется условием полного внутреннего отражения на границе жила — оболочка (угол падения должен быть больше критического угла $\beta_п$). Тогда все лучи, удовлетворяющие условию $\sin\beta \leqslant \sqrt{n_в^2 - n_0^2}$, где $n_в$ и n_0 — показатели преломления волокна и оболочки соответственно, пройдут через световод. Лучи, падающие на торец под бо́льшими углами, войдя

в световод, быстро рассеиваются. Изменяя отношение $n_в/n_0$, можно менять угловое поле зрения световода. Диаметр волокна должен в несколько раз превышать длину волны излучения и в то же время в десятки раз быть меньше радиуса изгиба световода для выполнения условия полного внутреннего отражения. Условия распространения лучистого потока при распространении по изогнутому световоду не нарушаются. Различают когерентные и некогерентные жгуты. Первые имеют идентичное геометрическое распределение волокон на обоих концах, и выходное изображение соответствует входному. В некогерентных жгутах распределение волокон на обоих концах случайно, и такие световоды предназначены только для передачи лучистого потока. Кроме гибких жгутов применение находят жесткие спеченные световоды в основном для передачи изображений. Общее число волокон световода достигает 10^5. Если волокна выполнены сужающимися, то световоды называют фоконами и предназначены они для изменения масштаба изображения.

Таблица 3.10

Параметры световодов

Гибкий жгут	Числовая апертура (sin β)	Длина жгута, мм	Сечение, мкм		Число жил в жгуте, шт.	Пропускание τ
			жгута	жилы		
Отечественный	0,54	1500	$(1\times4)\cdot10^3$	5 ... 50	$<10^7$	0,1 ... 0,15
Зарубежный	0,5 ... 0,6	800 ... 1800	$(0,8 ... 1)\cdot10^3$ $(3\times3)\cdot10^3$	5 ... 15	$10^6 ... 10^7$	0,2 ... 0,3

Жилы из обычных оптических стекол пропускают видимые и частично инфракрасные излучения (длиной волны до 2,5 мкм). Волокна из лактанового стекла прозрачны в диапазоне 1 ... 3 мкм. Полимерные волокна пропускают излучения в видимом и коротковолновом инфракрасном (около 1 мкм) диапазонах. Сернисто-мышьяковистое (AsS) стекло хорошо пропускает в диапазоне 3 ... 9 мкм, а трехсернисто-мышьяковистое стекло (As_2S_3) — в диапазоне 2,5 ... 9 мкм. Волокна из композиций мышьяк — селен — теллур, германий — селен — теллур пропускают до 80% излучения в диапазоне 2 ... 12 мкм. Другие параметры световодов приведены в табл. 3.10.

Поляризаторы предназначены для получения поляризованных излучений. Если они используются для обнаружения поляризованного света, их называют *анализаторами*. По принципу действия выделяют двулучепреломляющие, дихроичные, отражательные, пропускающие, интерференционные и другие поля-

ризаторы. Придерживаясь этой классификации, коротко рассмотрим их основные свойства.

Известно, что в оптически анизотропных средах показатель преломления зависит от направления распространения электромагнитной волны и ее плоскости поляризации. Анизотропные среды разлагают естественный свет на два ортогонально-поляризованных компонента: обыкновенную волну (индекс «о») и необыкновенную (индекс «е»). Обыкновенная волна лежит в плоскости падения и подчиняется закону Снеллиуса. Необыкновенная волна не лежит в плоскости падения. Вместе с тем в анизотропных кристаллах есть направление, называемое оптической осью, в котором двулучепреломление отсутствует (т. е. показатели преломления n_e и n_o равны).

Вдоль оптической оси обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются, не раздваиваясь. Плоскость, проходящая через оптическую ось и направление распространения, называют главной плоскостью (главным сечением) одноосного кристалла. В некоторых кристаллах (двухосных) существует два направления, вдоль которых не происходит двойного лучепреломления. Главным сечением таких кристаллов называют плоскость, проходящую через обе его оптические оси.

Явление прохождения света через анизотропные среды лежит в основе работы двулучепреломляющих поляризаторов, изготовляемых в виде кристаллических призм. Различают однолучевые и двухлучевые поляризационные призмы, дающие на выходе соответственно один плоскополяризованный пучок или два пучка, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях.

В однолучевых поляризаторах один компонент проходит через призму, другой отражается гранью. Устройства такого типа известны под названиями призм Николя, Франка — Риттера, Глана — Томпсона, Аренса и т. д. Призма Николя составлена из двух призм, вырезанных из кристаллов исландского шпата и склеенных с помощью бальзама (рис. 3.29). Оптическая ось aa' образует с входной гранью угол 48°. Пучок естественного света, войдя в призму, разделяется на обыкновенный и необыкновенный лучи, которые поляризуются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Направления распространения лучей принято обозначать стрелками, когда они лежат в плоскости чертежа, и точками, когда они проходят в перпендикулярной чертежу плоскости. Так как показатель преломления для обыкновенного луча $n_0 = 1{,}658$ больше показателя преломления бальзама $n_б = 1{,}51 \ldots 1{,}55$, происходит его полное внутреннее отражение. Для необыкновенного луча $n_e < n_б$, и он проходит через призму. Однолучевые поляризаторы выпускаются промышленностью на диапазон длин волн 0,3 ...

... 2,3 мкм. В качестве исходного материала преимущественно используется кальцит ($CaCO_3$).

Двухлучевые поляризаторы отличаются от однолучевых ориентацией оптических осей склеиваемых призм и пропускают

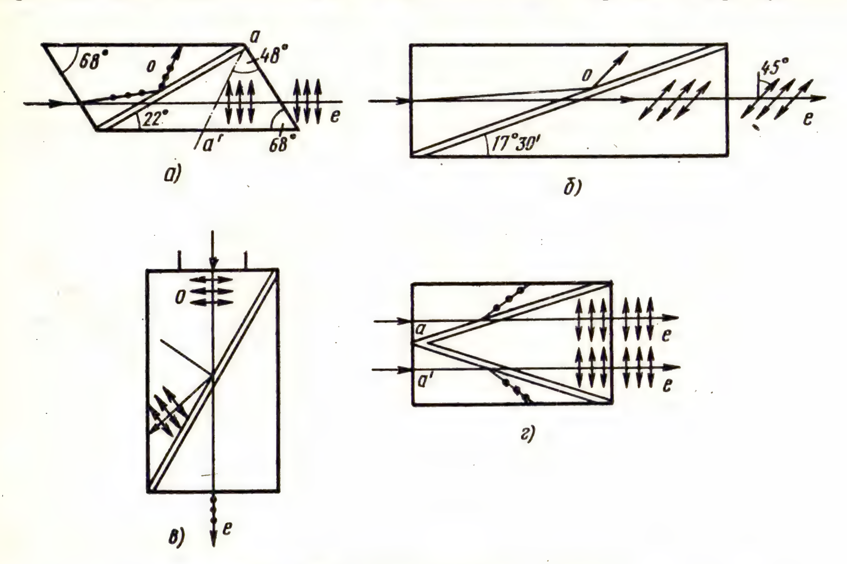


Рис. 3.29. Поляризационные призмы:
а — Николя; *б* — Франка — Риттера; *в* — Глана — Томпсона; *г* — Аренса

оба луча на выход устройства (рис. 3.30). Двухлучевые поляризаторы выпускают для видимой и инфракрасной областей спектра (0,3 ... 5 мкм). Степень поляризации $\Delta_п$, обеспечиваемая этими устройствами, достигает 0,999. Степень поляризации

$$\Delta_п = (J_\perp - J_\parallel)/(J_\perp + J_\parallel),$$

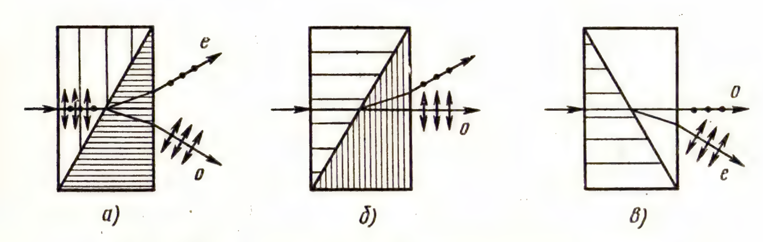


Рис. 3.30. Двухлучевые поляризационные призмы:
а — Волластона; *б* — Рошона; *в* — Сенармона

где $J_\perp$, $J_\parallel$ — плотности потоков энергии ортогонально поляризованных компонентов выходящей из поляризатора волны при падении на него неполяризованного излучения.

В некоторых материалах происходит не только разделение света на два ортогональных линейно поляризованных компонента, но и поглощение одной из них (явление *дихроизма*). Например, в пластинке из турмалина обыкновенный луч сильно поглощается, а необыкновенный пропускается. Такими же свойствами обладают кристаллы иодистого соединения сернокислого хинина (герапатит), пленки поливинилового спирта, окрашенные раствором иода, и др. На основе этих материалов созданы *дихроичные поляризаторы* (используются также термины *поляроид, поляризационный светофильтр*). Поляроиды —

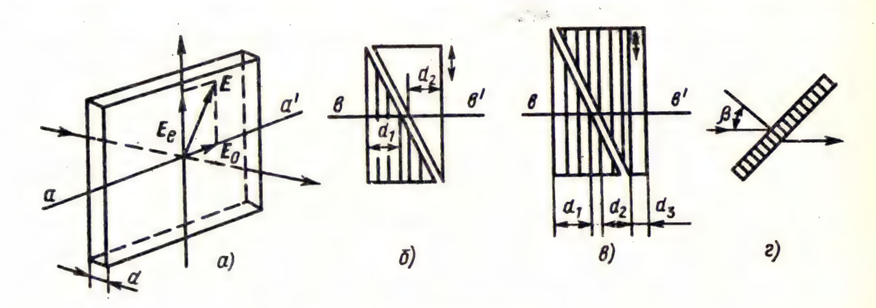


Рис. 3.31. Компенсаторы:

а — пластинка; *б* — Бабине; *в* — Солейля; *г* — Берека; *аа'* — направление, перпендикулярное оптической оси кристалла, *bb'* — направление падающей волны; β — угол падения волны

это тонкие (около 50 мкм) пленки, вклеенные между пластинками стекла, ацетилцеллюлозы и др. Пропускание их в видимом диапазоне колеблется от 0,145 до 0,33, а степень поляризации составляет $\Delta_п = 0{,}99$. Для инфракрасной области спектра отечественная промышленность выпускает поляризаторы ПТИ-2-А, ПТИ-2-Б, ПТИ-2-В, ПТИ-2-Г, обладающие пропусканием 0,4 при $\Delta_п = 0{,}25 \ldots 0{,}999$ (нижняя граница соответствует длине волны $\lambda = 2{,}7$ мкм).

Среди других распространенных элементов поляризационных приборов важную роль играют *компенсаторы* — устройства, предназначенные для изменения разности фаз между двумя ортогонально-поляризованными компонентами излучения. Простейший из них представляет кристаллическую пластинку, вырезанную из одноосного кристалла параллельно его оптической оси (рис. 3.31). При падении на пластинку линейно поляризованного излучения (вектор **E** на рис. 3.31) в ней распространяются два луча в главных направлениях (E_e, E_0): вдоль оптической оси кристалла и вдоль направления, перпендикулярного оси. Из-за разности скоростей распространения лучей формируется разность фаз между ними $\varphi = 2\pi d(n_0 - n_e)/\lambda$, и излучение на выходе пластинки становится эллиптически поля-

ризованным (см. пример 1.1.1). В частном случае, когда $d(n_0-n_e)=\lambda/4$ ($\varphi=\pi/2$, излучение эллиптически поляризовано), пластинку называют «пластинкой в четверть длины волны». В случае выполнения условия $d(n_0-n_e)=\lambda/2$ ($\varphi=\pi$) выходное излучение остается линейно поляризованным и пластинка носит название *«пластинка в половину длины волны»*.

Для компенсации разности фаз при обнаружении и исследовании поляризованного излучения применяют компенсаторы Бабине, Солейля, Берека и др. (рис. 3.31, *б — г*). Компенсатор Бабине (рис. 3.31, *б*) представляет сочетание двух кварцевых призм-клиньев, вырезанных так, чтобы их оси при сочленении оказались взаимно перпендикулярными. С помощью микрометрического винтового механизма один клин можно перемещать относительно другого. В произвольном сечении bb' разность фаз $\varphi=2\pi(n_e-n_0)(d_1-d_2)/\lambda$ регулируется изменением толщин клиньев d_1 и d_2 с помощью микрометрического винта.

Компенсатор Солейля отличается ориентацией оптических осей клиньев и наличием дополнительной кварцевой пластинки (рис. 3.31, *в*). Разность фаз, обеспечиваемая этим устройством, $\varphi=2\pi(n_e-n_0)[d_3-(d_1+d_2)]/\lambda$, где d_1, d_2 — толщины клиньев в сечении bb'; d_3 — толщина пластины. Компенсатор Берека (рис. 3.31, *г*) выполнен в виде плоскопараллельной пластины из одноосного кристалла, разность фаз $\varphi=2\pi d n_0 (\sqrt{1-n_e^{-2}\sin^2\beta}-\sqrt{1-n_0^{-2}\sin^2\beta})/\lambda$. Компенсатор Солейля применяют для измерения и исследования малых разностей хода, компенсатор Бабине — больших разностей хода. Основное достоинство компенсатора Берека — простота, он используется в биологических микроскопах.

Модуляторы используются для изменения во времени параметров оптического излучения по заданному закону. Различают оптико-механические, магнито-, электро- и акустооптические модуляторы. Ограничимся рассмотрением приборов, построенных на основе эффекта Поккельса и дифракции света на неоднородностях коэффициента преломления.

Электрооптические модуляторы изготавляют из пьезокристаллов (KH_2PO_4, $NH_4H_2PO_4$), кристаллов (Ga, As, GaP, ZnS и т. д), керамики (ЦТСЛ) и др., показатель преломления которых изменяется под действием электрического поля пропорционально его напряженности (*эффект Поккельса*) или квадрату напряженности (*эффект Керра*). В одноосном пьезокристалле показатель преломления изменяется в зависимости от направления, что описывается оптической индикатрисой, которая при отсутствии электрического поля представляет окружность (рис. 3.32, *а*). Под действием электрического поля индикатриса преобразуется в эллипсоид с главными осями OX′ и OY′, составляющими угол 45° с исходными осями *OX* и *OY*.

Если на кристалл направить линейно поляризованное по оси OX излучение, в нем формируются две ортогонально-поляризованные составляющие с одинаковыми амплитудами и разными скоростями распространения. Разность фаз $\varphi = 2\pi n^3 r U_п / \lambda$, где

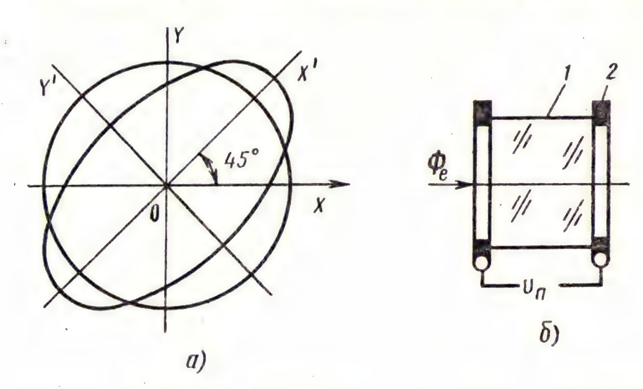


Рис. 3.32. Сечение оптической индикатрисы одноосного пьезокристалла (*а*) и схема модулятора (*б*):

1 — кристалл; *2* — электрод

n — показатель преломления; r — электрооптическая константа, зависящая от приложенного к кристаллу напряжения $U_п$. При $\varphi = \pi/2$ выходное излучение поляризовано по окружности, при $\varphi = \pi$ поляризация ортогональна исходной, в остальных случаях — излучение эллиптически поляризовано. При изменении напряжения $U_п$ модулируется поляризация излучения. При прохождении его через анализатор оно становится модулированным по закону $J = J_0 \sin^2(\varphi/2)$, где J_0 — плотность потока энергии падающего излучения. Схема модулятора на основе эффекта Поккельса приведена на рис. 3.32, *б*, основные параметры выпускаемых отечественной промышленностью приборов представлены в табл. 3.11.

Показатель преломления кристалла изменяется при создании в нем упругих напряжений. Это явление названо *фотоупругостью* или *акустооптическим эффектом* и используется в *дифракционных модуляторах*. Они состоят из кристалла *1* и пьезодатчика *2*, назначение которого — создать в кристалле акустическую волну (рис. 3.33). Под воздействием распространяющейся акустической волны показатель преломления изменяется по периодическому закону, и пучок оптического излучения испытывает дифракцию на неоднородностях среды.

Энергия выходного излучения зависит от амплитуды акустической волны, что и позволяет осуществить модуляцию излучения. Длина взаимодействия излучения с акустической волной находится из выражения $d = \Lambda^2 n/\lambda$, где Λ — длина акустиче-

ской волны. Если угол падения лучей выбран из условия $\sin\beta=\lambda/(2\Lambda)$, он называется *углом Брэгга.* При выполнении дополнительного условия $\pi d\lambda \gg 1$ наблюдается дифракция Брэгга, при которой плотность потока энергии всех дифракционных максимумов, кроме минус первого, пренебрежимо мала. В табл. 3.12 приведены основные параметры дифракционных модуляторов MHIV50 и MAR50 фирмы «Соро» (Франция).

Таблица 3.11

Параметры электрооптических модуляторов

Параметр	Электрооптические модуляторы			
	МЛ-3	МЛ-4	МЛ-5	МЛ-7
Область прозрачности, мкм	0,35 ... 1,2	0,45 ... 2	0,45 ... 2	>1
Длина волны излучения, мкм	0,63	0,51; 0,63	0,63	10,6
Напряжение полного просветления, В	480	130 ($\lambda=$ $=0,5$ мкм), 190 ($\lambda=$ $=0,63$ мкм)	185	2700
Максимальный диаметр светового луча на входе, мм	2,5	1	1,5	—
Максимальная расходимость луча, рад	$5,2\cdot10^{-3}$	$4,5\cdot10^{-3}$	$4,5\cdot10^{-3}$	—
Потери излучения в режиме полного просветления, %	30	40	20	40
Полоса частот модуляции, МГц	0,001 ... 100	0 ... 100	0 ... 200	0 ... 25

Модуляторы широко используют в прецизионных оптико-электронных приборах для уменьшения влияния фона излучения и повышения чувствительности приборов, а также в оптических системах оптимальной фильтрации (см. кн. 5). Рассмотренные модуляторы МЛ-3, МЛ-4, МЛ-5 характеризуются различными рабочими диапазонами длин волн. По сравнению с модулятором МЛ-3 приборы МЛ-4 и МЛ-5 более термоустойчивы, но не гигроскопичны. Модулятор МЛ-7 используется для инфракрасной области спектра; дифракционные модуляторы позволяют работать с большой расходимостью светового пучка.

Оптические фильтры предназначены для изменения соотношения спектральных составляющих падающего излучения. По виду спектральной характеристики они разделяются на полосовые, длинноволновые отсекающие, коротковолновые пропускающие и имеют граничные длины волн λ_{min}, λ_{max}. Из других параметров фильтров следует выделить коэффициент пропуска-

ния τ (оптическая плотность D_τ), ширину полосы пропускания, апертуру. Коэффициент пропускания связан с оптической плотностью соотношением $D_\tau = \lg(1/\tau)$ и при последовательной установке нескольких фильтров $\tau_\Sigma = \prod_i \tau_i$ $\left(D_{\tau\Sigma} = \sum_i D_{\tau i}\right)$.

Спектральную полосу определяют по точкам спектральной кривой, в которых плотность потока прошедшего излучения падает в два раза по сравнению с максимальной. Апертура фильтра есть угловая ширина входного пучка, при которой спектральная характеристика фильтра заметно не ухудшается. В практике контроля находят применение несколько типов фильтров.

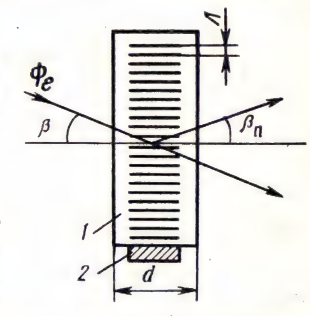


Рис. 3.33. Акустооптический модулятор

Абсорбционные фильтры изготовляют из материалов, поглощающих излучение в отдельных участках спектра и пропускающих в других. Используются преимущественно стеклянные пластинки, комбинацией которых подбирается требуемая спектральная характеристика фильтра. Отечественная промышленность выпускает набор из 117 паспортизованных образцов. Апертура фильтра определяется из соотношения $(\Delta\tau/\tau) = (1{,}2D_\tau \sin\beta)/\beta$ по допустимому изменению пропускания $(\Delta\tau/\tau)_{доп}$ в зависимости от угла падения лучей β.

Таблица 3.12

Параметры модуляторов

Параметр	Частота, МГц	Пропускание излучения, %	Спектральный диапазон пропускания, мкм	Управляющее напряжение, В
MHIV50	250	95	0,6328	0 ... 5
MAR50	200; 250	95	0,488 ... 0,5145	0 ... 5

Интерференционные фильтры представляют многослойные структуры с соответствующим образом подобранными оптическими и геометрическими параметрами слоев. В основе их работы лежит принцип многолучевой интерференции. Фильтры характеризуются узкой полосой пропускания (до 2 нм).

Интерференционно-поляризационные фильтры состоят из двух поляризаторов, между которыми размещена пластинка одноосного кристалла. Оси поляризаторов устанавливаются параллельно, а ось пластинки — под углом 45°. Коэффициент

пропускания τ фильтра зависит от длины волны: $\tau = \cos^2[\pi(n_e - n_0)d]\lambda^{-1}$, полоса пропускания достигает сотых долей нанометра, пропускание в максимуме полосы достигает 0,5.

Разработаны фильтры и на других оптических явлениях — дисперсии излучения, полного внутреннего отражения, дифракции лучей на решетке и т. д. Среди них особый интерес представляет новый класс фильтров — акустооптические [21].

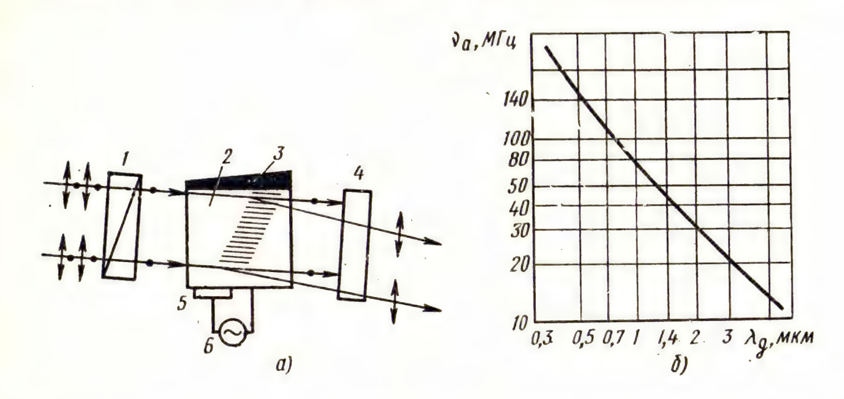


Рис. 3.34. Акустооптический фильтр (*а*) и характеристика его перестройки (*б*): *1* — поляризатор; *2* — монокристалл; *3* — поглотитель; *4* — анализатор; *5* — пьезопреобразователь; *6* — генератор

Акустооптический фильтр — это прибор с электрически управляемой спектральной характеристикой пропускания. Принцип действия фильтра основан на дифракции Брэгга при взаимодействии оптического излучения с ультразвуковыми колебаниями в анизотропном двулучепреломляющем кристалле. При распространении ультразвука в одноосном монокристалле создаются локальные механические напряжения и в силу эффекта фотоупругости происходят локальные изменения коэффициента преломления *n*. Иными словами, образуется периодическая фазовая структура с периодом ультразвуковых колебаний, при прохождении через которую излучения возникает дифракция Брэгга.

Схема фильтра приведена на рис. 3.34, *а*. Входное излучение проходит поляризатор *1* и попадает в монокристалл *2*. При подаче на пьезопреобразователь *5* электрических колебаний от генератора *6* в монокристалле возбуждаются объемные ультразвуковые колебания, поглощаемые в поглотителе *3*. Частота ультразвуковых колебаний ν_a связана с длиной волны дифрагирующего излучения λ_g:

$$\lambda_g = (v_a/\nu_a)\left[n_i \sin\varphi_i \sqrt{n_0^2 - n_i \cos\varphi_i}\right],$$

где

$$n_i = n_0 n_e \Big/ \sqrt{n_e^2 \cos^2(\varphi_i + \varphi_a) + n_0^2 \sin(\varphi_i + \varphi_a)},$$

v_a — скорость распространения ультразвуковых колебаний в кристалле; φ_i, φ_a — углы распространения излучения и ультразвука соответственно; n_0, n_e — коэффициенты преломления монокристалла для обыкновенного и необыкновенного лучей. На рис. 3.34, *б* показана зависимость v_a от λ_g фильтра на базе кристалла TeO_2.

Плоскости поляризации дифрагированного и недифрагированного лучей на выходе кристалла *2* взаимно ортогональны. Этот эффект используется для подавления недифрагированного излучения с помощью анализатора *4*. Дифрагированное излучение можно отделить, используя его отклонение от оптической оси на угол $(n_e - n_0)\sin(2\varphi_i)$.

Спектральная характеристика акустооптического фильтра

$$\eta_\lambda = \eta_g \sin^2[l_a(\lambda_g - \lambda)/\lambda_g^2],$$

где l_a — длина акустооптического взаимодействия; η_g — пропускание на длине волны λ_g. Ширина полосы пропускания фильтра на уровне 0,5 определяется выражением $\Delta\lambda = 1{,}8\,\pi\lambda_g^2/bl_a \sin^2\varphi_i$, где b — дисперсионная константа. Возбуждение фильтра одновременно на нескольких частотах позволяет сформировать любую желаемую характеристику пропускания.

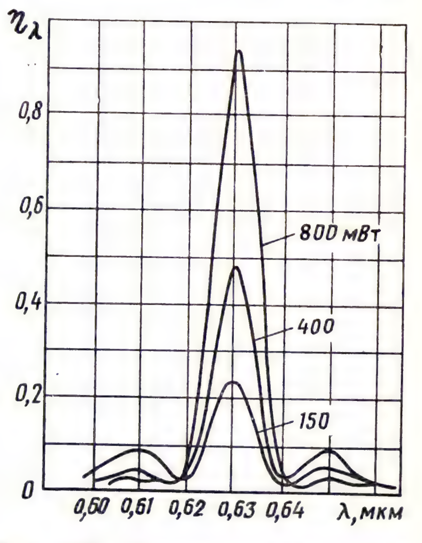


Рис. 3.35. Спектральная характеристика пропускания акустооптического фильтра при $\lambda_g = 0{,}63$ мкм ($f_a = 118$ МГц) в зависимости от мощности ультразвуковых колебаний

Акустооптические фильтры на основе кристалла TeO_2 работают в диапазоне 0,3 ... 5 мкм, на кварце — в диапазоне 0,15 ... 2,5 мкм, на ортоселените галлия — в диапазоне 1,25 ... 17 мкм. Пример спектральной характеристики пропускания фильтра приведен на рис. 3.35.

Сравнивая рассмотренные фильтры, следует отметить простоту исполнения абсорбционных фильтров. Интерференционные фильтры имеют наиболее узкую полосу пропускания, акустооптические обладают возможностью ее регулирования, в том числе изменения положения по оси частот.

Приборы для увеличения изображений широко используют на практике, в основном для контроля размеров ОК, Принцип работы этих приборов достаточно подробно изложен в курсе физики, читаемом для студентов вузов. С особенностями их применения для НК можно познакомиться в справочной литературе [1].

Дадим ряд дополнительных сведений об этих приборах.

Введем понятие «видимое увеличение», которое используется при работе оптической системы (ОС) совместно с глазом. Оно определяется расстоянием от объекта до невооруженного глаза l_{or} и фокусным расстоянием ОС $f'_{oc}\Gamma_{oc} = -l_{or}/f'_{oc}$. По структуре ОС представляет последовательно установленные *объектив* и *окуляр*. Объектив строит изображение предметов в фокальной плоскости окуляра, за которым располагается глаз наблюдателя, и характеризуется увеличением $\Gamma_{об} = -f/x = -x'/f'$, где $-f = f'$ — фокусное расстояние; x и x' — расстояния от предмета до фокуса объектива и от изображения до фокуса изображения. С учетом выражения для $\Gamma_{об}$ можем записать $f'_{oc} = f'_{ок}/\Gamma_{об}$, где $f'_{ок}$ — фокусное расстояние окуляра, и $\Gamma_{oc} = -l_{об}\Gamma_{об}/f'_{ок}$. При $l_{or} < 250$ мм последняя формула используется для расчета *микроскопов*, при $l_{or} \gg 250$ мм — для расчета *телескопических систем*.

Отрезок x' называется длиной тубуса. Длина тубуса определяется ГОСТом и составляет 160 ... 200 мм. Микроскопы снабжают набором окуляров с фокусным расстоянием от 10 до 40 мм. Увеличение ОС выбирается из условия $\Gamma_{oc} = 0{,}075\delta$, где δ — минимальный размер объекта, соответствующий разрешающей способности глаза наблюдателя, равной 1′.

Если $\delta = 0{,}0006$ мм, то $\Gamma = 125^*$.

Апертура микроскопа A_p связана с разрешающей способностью ОС. Согласно критерию Рэлея $\delta = \lambda/2A_p$ и $A_p = \lambda/2\delta$, что позволяет определить диаметр выходного зрачка микроскопа $D' = 500\ A_p/\Gamma_{oc}$. Принимая $D' = 0{,}5$ мм; $A_p = 1$, получаем $\Gamma_{oc} = 1000^*$.

В практике НК находят применение микроскопы с увеличением 9 ... 400*. Измерение глубины поверхностных дефектов осуществляют путем последовательной фокусировки на дно и вершину дефекта и регистрацией перемещения тубуса микроскопа. Погрешность таких измерений оценивается величиной 1 ... 20 мкм (микроскопы МИН-8, ОГ-40 и др.).

Более точные результаты измерений (до 0,1 мкм) удается получить с помощью интерференционных приборов, принцип действия которых основан на сравнении излучений получаемых при отражении когерентных лучей света от контролируемой и образовой поверхности. Кривизна образующихся при наложении изображений интерференционных полос соответствует профилю исследуемой поверхности и измеряется микроскопом. Среди приборов этого класса следует отметить отечественные микроинтерферометры МИН-4, МИН-5, МИН-9.

Для исследования анизотропных прозрачных и непрозрачных объектов в геологии, минералогии, петрографии и кристаллографии, а также в биологии, химии, медицине применяют *поляризационные микроскопы*. В отличие от рассмотренных приборов в микроскопах этого класса источником информации выступает интерференционная картина поляризованных лучей. Анизотропия ОК проявляется в поляризованном свете, что позволяет судить о его структуре и свойствах.

Модели поляризационных микроскопов отличаются друг от друга конструкцией и комплектом дополнительных устройств. Все они имеют вращающийся предметный столик с лимбом для измерения углов поворота, устройство для центрирования объектива или предметного столика, поляризатор и анилизатор с приспособлением для поворота, оптические элементы. Среди приборов этого класса распространены микроскопы серии «Полам». Микроскоп «Полам Р-111» используется для исследования прозрачных объектов в проходящем поляризованном свете. В его комплект входит набор объективов с увеличением 3×, 5×, 9×, 20×, 40× и 60× и окуляры двух типов: с перекрестием, ориентированным относительно колебаний поляризованного света, и из-

мерительные с увеличением 6× и 10×, в поле зрения которых установлена шкала или сетка. Общее увеличение микроскопа «Полам Р-111» колеблется в зависимости от применяемых объективов и окуляров от 26,4 до 720×.

Эндоскопы, или *бороскопы,* применяют для контроля внутренних поверхностей и обнаружения дефектов в труднодоступных местах. Разработаны и выпускаются промышленностью линзовые, волоконно-оптические и комбинированные эндоскопы, отличающиеся применяемыми элементами и конструктивными особенностями. Линзовые эндоскопы выполнены в виде цилиндрической трубки, внутри которой размещена оптическая система для передачи изображения контролируемой поверхности. На конце трубки, вводимой в ОК, установлен источник света. Изображение подсвеченной поверхности через оптическую систему выводится на другой конец трубки для наблюдения. Линзовыми эндоскопами обнаруживаются трещины, царапины, коррозионные пятна, выбоины и другие дефекты размером 0,03 ... 0,08 мм в изделиях длиной до 10 м и диаметром 5 ... 100 мм [1].

Волоконно-оптические эндоскопы позволяют передавать изображения без искажения при их изгибе. Конструктивно они выполнены в виде блока подсветки, включающего источник света и осветительный световод длиной до 2,5 м и второй световод для передачи изображения подсвеченного участка наблюдателю. Оба световода заключены в герметичный металлорукав гибкой или полужесткой конструкции. В отличие от линзовых эндоскопов, диаметр которых превышает 20 мм, диаметр волоконно-оптических приборов обычно не превышает 14 мм.

Промышленностью выпускаются комбинированные эндоскопы, передача изображения в которых осуществляется оптической системой, а подсвет ОК — с помощью световода.

Существуют и более сложные системы, позволяющие сформировать изображение предметов в любой области оптического спектра, передать его на расстояние и представить оператору в видимом диапазоне длин волн в желаемом масштабе. Подобные системы, предназначенные для визуализации отраженных от ОК излучений, получили название телевизионных, а преобразующие собственное тепловое излучение (ОК) в видимое — тепловизионных. Идею построения таких систем можно пояснить с помощью обобщенной структурной схемы, представленной на рис. 3.36.

С помощью объектива *2* в плоскости приемника излучения *3* формируется плоское изображение ОК *1.* Приемник излучения последовательно преобразует лучистую энергию в каждой точке изображения во временной видеосигнал. Информация о координатах преобразуемого приемником элемента изображения формируется устройством синхронизации *4* в виде сигнала синхронизации, который суммируется с видеосигналом в блоке

усиления и формирования телевизионного сигнала *5*. Роль канала связи *6* могут выполнять, например, кабельная, радиорелейная, волноводная линии связи. Блок *7* усиливает сигнал до уровня, необходимого для управления преобразователем «сигнал — свет» *9*, и выделяет сигнал синхронизации для управления развертывающим устройством *8*. В преобразователе *9* осуществляется поэлементный синтез переданного изображения в видимом диапазоне излучений.

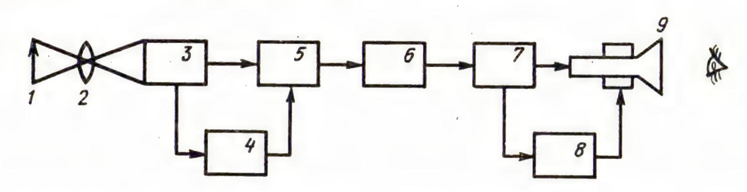


Рис. 3.36. Обобщенная структурная схема телетепловизионной системы

За телевизионными системами, применяемыми в промышленности, закрепилось название *промышленные телевизионные установки* (ПТУ). Они включают передающие и приемные устройства, а также канал связи. В состав передающих устройств входят одна или несколько телевизионных камер с устройствами наведения на объект (или без них) и блок камерного дешифратора для коммутации входных сигналов камер на вход линейного усилителя. Полный телевизионный сигнал поступает в линию связи, подключенную на приемной стороне к линейному усилителю, который через усилитель-распределитель связан со входами видеоконтрольных устройств. Управление установками на передающей стороне (выбор камеры, оптическое фокусирование, масштабирование, наведение камеры в горизонтальной и вертикальных плоскостях, включение и выключение) осуществляется на приемной стороне с пульта управления, команды которого передаются по кабелю на камерный дешифратор, связанный с исполнительными механизмами. Основные параметры некоторых отечественных установок приведены в табл. 3.13. Геометрические искажения определяются нарушением геометрического подобия передаваемого и отображаемого изображений в электронно-оптических системах, нелинейные — возникают за счет неравномерности скорости разверток и при уровне до 5% не заметны глазом.

Если в промышленной телевизионной установке использовать приемник, чувствительный к не видимому глазом инфракрасному излучению, то такую систему можно назвать *прибором ночного видения*. Эти приборы предназначены для наблюдения различных объектов в ночное время. Действие их основано на регистрации собственного или отраженного излучения наблюдаемых объектов. Различают электронно-оптические, радиооптические и термографические приборы ночного видения,

Для построения электронно-оптических приборов чаще всего используют электронно-оптические преобразователи, длинноволновая граница чувствительности которых составляет 1,2 мкм. Ряд приборов работает при освещении ОК естественными источниками подсвета (Луна, звезды). Однако для нормальной работы большинства из них требуется искусственный подсвет специальными прожекторами, лазерами. Электронно-оптические приборы применяют для вождения транспортных средств в ночных условиях, для исследования плазмы, контроля состояния живых тканей, определения подделок в документах и т. д.

Работа радиооптических приборов основана на использовании отраженного от объекта излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. Эти приборы еще находятся в стадии разработки.

Термографические приборы осуществляют поэлементный обзор пространства и регистрируют плотность потока собственного излучения каждого просматриваемого элемента. С помощью специального устройства строится видимое изображение объекта, адекватное его температурному полю. По такому принципу работают приборы, получившие название тепловизоров.

Таблица 3.13

Параметры промышленных телевизионных установок

Параметр	ПТУ «Матрица»	ПТУ-51	ПТУ-61
Тип приемника излучения	Матрица ПЗС	Видикон ЛИ441	Видикон ЛИ475
Число камер	1	8	1
Число строк	288	500	450
Номинальная освещенность, лк	1 ... 9	1	100 ... 50 000
Число различимых градаций яркости	6	7	—
Геометрические искажения, %	—	3	4
Нелинейные искажения, %	—	4	10
Потребляемая мощность, Вт	18 (без ВКУ)	310	45
Длина линии связи, км	0,6 ... 1,7	0,5	1
Масса камеры, кг	0,9	8	1,6

Тепловизионные системы — тепловизоры [22], применяемые в настоящее время, выполнены в основном на базе одноэлементного приемника. Обобщенным классификационным признаком этих приборов служит время сканирования одного кадра изображения $t_к$.

Различают медленнодействующие ($t_к \geqslant 10$ с), среднескоростные ($t_к = 0,2 ... 10$ с) и быстродействующие ($t_к < 1/16$ с) тепловизоры. Последняя группа приборов широко используется для решения задач НК. Типичным для этой группы приборов является тепловизор AGA-680 фирмы Agema (Швеция) (рис. 3.37, *а*). Входной объектив *1* допускает фокусировку излучения предметов, находящихся на расстоянии не менее 0,95 м. Оптико-механическое сканирующее устройство состоит из кадровой *2* и строчной *3* пропускающих призм. Расходящийся пу-

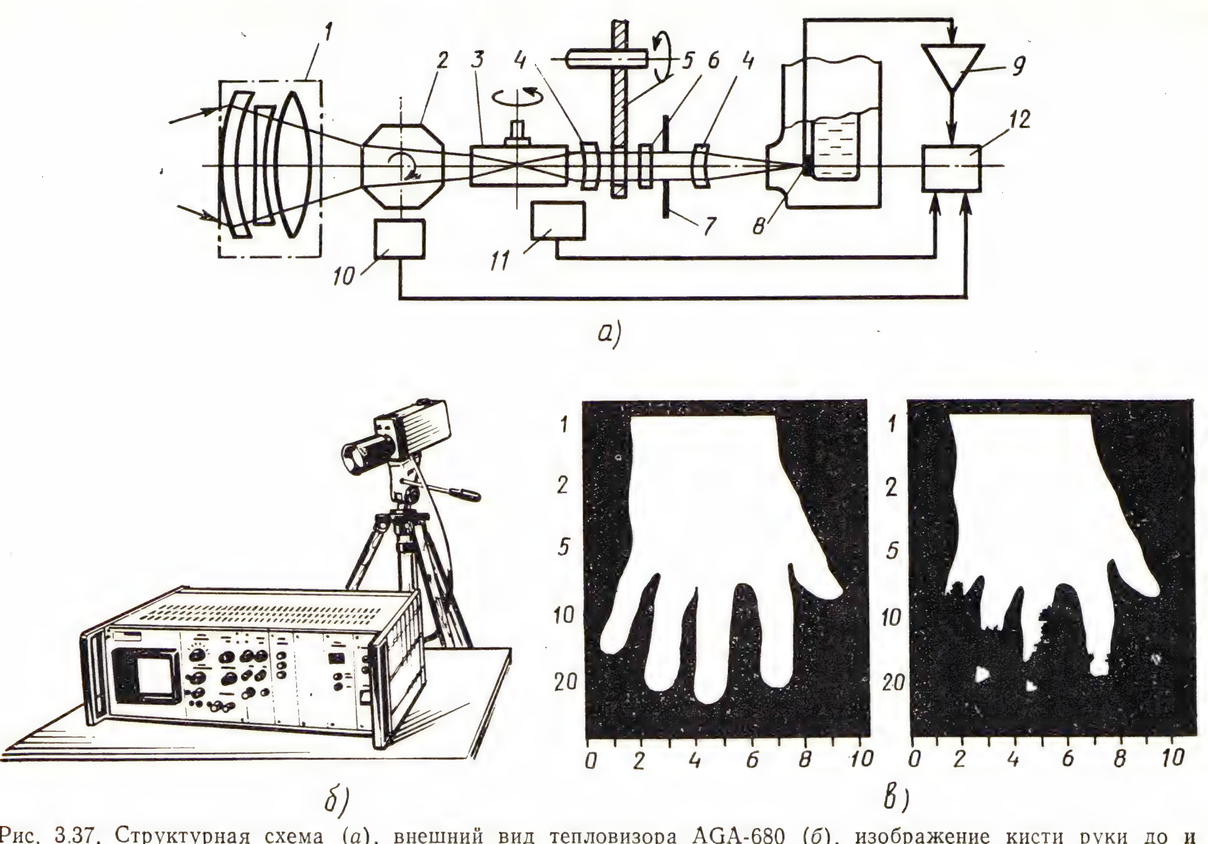


Рис. 3.37. Структурная схема (*а*), внешний вид тепловизора AGA-680 (*б*), изображение кисти руки до и после курения (*в*)

Таблица 3.14

Параметры тепловизоров фирмы «Agema»

Параметры	AGA-680	AGA-720	AGA-750	AGA-782	AGA-880
Температурное разрешение, °С	0,2	0,1	0,15	0,1	0,07
Пространственное разрешение, мрад	1,3 ... 3,5	1,9	3,4	0,5	0,7 ... 2,0
Частота кадров, Гц	16	25	25	25	25
Число строк	100	100	100	100	(175 эл/стр)
Температурный диапазон, °С	—30 ... +850	—20 ... +200	—20 ... +900	—20 ... +900	—20 ... +800
Диапазон фокусировки, м	0,95 ... ∞	0,7 ... ∞	0,5 ... ∞	—	0,5 ... ∞
Габаритные размеры:					
камеры, мм	200×240×500	80×125×248	80×125×196	80×125×140	93×150×205
ВКУ *, мм	450×200×530	253×129×322	263×129×322	253×129×322	253×129×322
Масса камеры, кг	13,5	1,8	1,5	1,6	—

* ВКУ — видеоконтрольное устройство.

чок конденсором *4* преобразуется в параллельный. Алюминиевый модулятор *5* прерывает излучение во время обратного хода по кадру, его вращение синхронизировано с вращением призмы *2.* В этот момент приемник регистрирует калиброванное излучение обратной стороны лопасти модулятора, и этим поддерживается постоянная составляющая выходного сигнала на одном уровне. Диафрагма *7* позволяет ограничивать попадающий на приемник поток излучения и тем самым изменять рабочий диапазон регистрируемых сигналов. Эта же задача решается путем установки нейтральных фильтров *6.* В качестве приемника излучения *8* используется фотодиод из InSb (на диапазон 3...5 мкм) либо фотосопротивление (диапазон 8... 14 мкм), охлаждаемые жидким азотом и связанные с предусилителем *9.* Датчики *10, 11* определяют положение элемента изображения и представляют преобразователи углового положения вала кадровой и строчной призм в электрические сигналы.

Плотность потока излучения элементов изображения преобразуется в электрические сигналы на выходе приемника. Эта информация используется для построения теплового изображения, идентичного наблюдаемому, в видимом диапазоне излучений (на экране видеоконтрольного устройства *12*).

Дальнейшее усовершенствование базовой модели AGA-680 привело к появлению моделей AGA-720, AGA-750, AGA-780, AGA-782, AGA-880, параметры которых приведены в табл. 3.14, имеющих более высокую частоту кадров (до 25 Гц), меньшие габариты, элементы обработки информации. В частности, модель AGA-880 позволяет сформировать и обработать термоизображение в реальном масштабе времени и предназначена для измерения температуры и анализа как статических, так и изменяющихся во времени изображений. По габаритам и массе сканирующего устройства она не отличается от обычной видеокамеры. Пространственное разрешение (175 элементов на строку) обеспечивает приемлемую четкость и контрастность изображения.

Высокая точность измерения температуры достигается применением микропроцессора и двух встроенных миниатюрных источников опорных температур, сканируемых во время каждого горизонтального хода развертки. Измеренные опорные температуры используются для регулирования сигнала в системе. Для исключения погрешности, вызываемой изменением температуры окружающей среды, введен канал регистрации температуры корпуса сканера в трех точках. По зарегистрированным температурам микропроцессор вырабатывает сигнал компенсации погрешности, обусловленной влиянием внешней среды.

Модель AGA-880 пригодна для эксплуатации в полевых условиях. Применение в сканирующем устройстве безколлекторных двигателей постоянного тока специальной конструкции и сведение к минимуму числа движущихся деталей позволило обеспечить большой срок службы и малое потребление электрической энергии,

Сканирующее устройство модели AGA-880 укомплектовано тремя объективами, имеющими углы поля изображения 7, 12 и 20° и фокусирующиеся как обычные фотографические объективы. Прилагаемый к модели набор оптических фильтров позволяет оптимизировать спектральное пропускание системы в зависимости от специфики ОК (полимеры, выхлопные газы, контроль в условиях подсветки лазерным лучом и т. д.).

Обработка и анализ тепловых изображений проводятся с использованием системы TIC 8000, построенной на базе персонального компьютера. Работа системы обеспечивается многофункциональным программным пакетом типа CAT, позволяющим выполнить вывод изображения на дисплей, измерение точечных температур и снятие профилей, построение гистограмм и оценку статистических характеристик сигналов, «вычитание» изображений и их увеличение. Предусмотрена возможность записи в память серии изображений, получаемых через задаваемые промежутки времени с целью последующего анализа изменений температурных полей в процессе контроля.

Чтобы охарактеризовать достигнутый уровень параметров тепловизионных систем при использовании в сканирующих устройствах колеблющихся зеркал, рассмотрим двухканальный тепловизор модели 210 фирмы Inframetrics (США). Конструктивно он состоит из трех блоков: сканирующего устройства, блока управления и черно-белого телевизионного монитора. Особенностью модели является возможность работы в пяти динамических диапазонах изменения температуры относительно некоторого уровня: 10, 20, 50, 100 и 200°С. Предусмотрены режимы отображения серой градуировочной шкалы на экране монитора, изменения полярности отображаемого изображения, высвечивания точек изображения, соответствующих определенной температуре (режим изотермы). Структурная схема сканирующего блока изображена на рис. 3.38.

Входное излучение поступает на отклоняющее зеркало *4* (вертикальная развертка), а затем — на зеркало горизонтальной развертки *3*. Колебание зеркал осуществляется приводными механизмами *2, 6*. После второго зеркала пучок попадает на расщепитель *5*, отражающий излучение с длинами волн 3...5 мкм через объектив *8* и фильтр *9* на первый приемник и про-

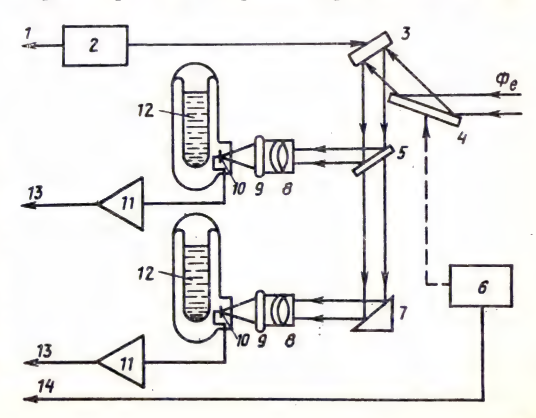


Рис. 3.38. Структурная схема тепловизора модели 210 фирмы Inframetrics (США)

1 — строчная синхронизация; *2* — привод развертки; *3* — горизонтальная развертка изображения; *4* — вертикальная развертка изображения; *5* — расщепитель пучка; *6* — привод кадровой развертки; *7* — зеркало; *8* — объектив; *9* — фильтры; *10* — детекторы излучения; *11* — предусилители; *12* — жидкий азот; *13* — видеосигнал; *14* — кадровая синхронизация

пускающий излучение с длинами волн 8 ... 12 мкм, которые через оптическую систему зеркало (*7*) — объектив (*8*) — фильтр (*9*) попадают на второй детектор. При синхронизации развертывающих зеркал образуется сигнал, подобный телевизионному. Приведем параметры модели 210.

Параметры модели 210 фирмы Inframetrics (США)

Диапазон измерения, °С	—20 ... 600
Температурное разрешение, °С	0,2
Поле зрения, град	14×18
Пространственное разрешение канала, число элементов на строку, в диапазоне:	
3 ... 5 мкм	75
8 ... 14 мкм	150
Частота кадров, Гц	30
Диапазон фокусировки, м	0,125 ... ∞
Потребляемая мощность, Вт	50
Размеры камеры, мм	140×203×216
Масса камеры, кг	5

В качестве примера на рис. 3.37, *в* приведены тепловые изображения кисти руки, полученные до и после курения одной сигареты (температура мизинца после курения понизилась на 3 °С [23]). На рис. 3.37, *б* показан внешний вид тепловизора.

Современные тепловизоры позволяют не только визуализировать распределение температуры поверхности ОК, но и провести ее измерение в различных точках на тепловом изображении. В этом случае их можно отнести к приборам бесконтактного измерения температуры тел — *пирометрам*. В основу действия пирометров положена зависимость мощности и спектрального состава излучения от температуры [см. формулы (3.7) и (3.8)]. В соответствии со спектром различают пирометры: монохроматические (яркостные), частичного излучения, полного излучения (радиационные) и спектрального отношения (цветовые).

В основу работы *яркостных пирометров* положена зависимость (3.7): $M_{e\lambda}=f(T)$. Спектральная плотность излучения реальных объектов зависит также от степени черноты поверхности $M_{e\lambda}=f(T, \varepsilon_\lambda)$. Показания прибора всегда занижены и соответствуют некоторой условной температуре $T_я$, связанной с истинной температурой T зависимостью

$$\frac{1}{T}=\left(\frac{1}{T_я}\right)-\ln\left[\varepsilon_\lambda+(1-\varepsilon_\lambda)\exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T_я}\right)\right]^{-1}\frac{\lambda}{c^2}.$$

Выпускаемые яркостные пирометры (ФП-3, ФЭП-4, ФЭП-60 и др.) применяются для контроля температуры ОК определенного класса (например, металлических листов), среднее значение коэффициента излучения которых $\overline{\varepsilon_\lambda}$ известно. Поэтому систематическую ошибку измерения можно скомпенсировать, доведя погрешность измерения до 1% верхнего предела измерительной шкалы T_{max}.

В *пирометрах частичного излучения* используется зависимость (3.10). Чтобы скомпенсировать систематическую ошибку измерения, необходимо знать зависимость $\varepsilon_\lambda=f(\lambda)$ в рабочем диапазоне длин волн $\lambda_1 ... \lambda_2$. Тогда, как показывает практика применения приборов этого класса (ФДП-1, ФДП-2, ИПЛ-102 и др.), достигается погрешность измерения до ±1,5% верхнего предела измерительной шкалы.

В основу работы *радиационных пирометров* положена зависимость (3.8). Применение неселективных приемников позволяет упростить конструкцию приборов этого класса. Погрешность измерения выпускаемых радиационных пирометров (РАПИР, ПРК-кварц, ПИРС-019 и др.) примерно в два раза больше, чем у рассмотренных ранее приборов.

В пирометрах спектрального отношения использована зависимость отношения спектральных плотностей энергетических яркостей от температуры ОК на двух длинах волн: λ_1 и λ_2. Истинная температура T связана с цветовой $T_ц$ соотношением

$$T^{-1} = T_ц^{-1} + \frac{\ln \varepsilon_{\lambda 1} - \ln \varepsilon_{\lambda 2}}{c_2 (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}.$$

Для АЧТ и серых тел ($\varepsilon_\lambda = \text{const}$) $T_ц = T$. Реально цветовая температура может быть больше или меньше T. Однако $T_ц$ и T отличаются меньше, чем яркостная радиационная температура, поскольку отношение $\varepsilon_{\lambda 1}/\varepsilon_{\lambda 2}$ более стабильно, чем значение самих коэффициентов черноты. Практика применения приборов этого класса (ЦЭПИР-021, ПИРСО-1, ПИРЭД-5 и др.) показывает, что отличие $T_ц$ от T не превышает 1%.

В последние годы получили распространение сканирующие пирометры. Как сканирующие пирометры, так и тепловизоры имеют одинаковую структурную схему. Поэтому ограничимся рассмотрением наиболее совершенных из выпускаемых систем.

Японской фирмой Chino разработан многофункциональный пирометр JR-N, имеющий две модификации: монохроматическую и двухцветовую. Предусмотрена возможность измерения спектральных коэффициентов излучения на рабочих длинах волн. Сканирование осуществляется колеблющимся зеркалом. Набор объективов позволяет изменять углы визирования: 7×7, 25×25 и 50×50°. В приборе применен матричный приемник излучения на основе ПЗС-структуры. Обработка информации возложена на компьютер.

Отечественный сканирующий пирометр СКАПИР предназначен для измерения температуры в произвольных точках ОК, определяемых программно с помощью микропроцессора. При использовании яркостных и цветовых пирометров вводится поправка на излучательную способность. Значение коэффициента ε_λ хранится в памяти микропроцессора. С помощью прибора выполняются следующие операции: выделение изотерм на объекте, фиксирование глобального и локального экстремумов температуры, а также зон с наименьшей и наибольшей динамикой изменения температуры. Параметры пирометра: углы визирования 31,5×21°, максимальное число точек сканирования 10^4 (200× ×50), погрешность измерения температуры 1%.

При неизвестной спектральной степени черноты ε_λ точная оценка температуры ОК по регистрируемой плотности потока излучения с помощью тепловизоров и пирометров невозможна. Исходя из существующих требований к надежности обнаружения дефектов, необходимо знание значения $\varepsilon_{\Delta\lambda}$ с точностью до десятых долей процента [24], для чего разрабатываются две группы методов.

В первой группе методов предусмотрена подготовка поверхности ОК путем специальной обработки. Наиболее надежным считается метод нанесения на контролируемую поверхность покрытий с высоким постоянным коэффициентом излучения. В качестве покрытий получили распространение суспензии графитового порошка в воде, гравировальная эмаль, винил, сажевые эмульсии и другие материалы. В принципе применение этого метода позволяет достичь требуемых результатов, однако следует помнить, что он малопроизводителен, требует хорошей адгезии покрытий с контролируемой поверхностью, толщина покрытий должна быть такой, чтобы исключить просвечивание подложки,

Из методов второй группы, основанных на обработке регистрируемого потока излучения, потенциальный интерес представляет метод с использованием источника подсвечивающего излучения.

С помощью спутников Земли можно решить ряд актуальных задач по контролю земной поверхности и приземного слоя воздуха — контроль климатических изменений на Земле, загрязнений океана нефтью, сточными водами, промышленными отходами, оценки биологической продуктивности океана, изменений состава морской воды, ожидаемого урожая, загрязнений атмосферы выбросами предприятий; поиск подземных пожаров каменного угля и продуктивных областей для разведки полезных ископаемых. Существует множество спутниковых программ и образцов приборов, предназначенных для решения указанных задач. В качестве примера рассмотрим отечественную многозональную систему «Фрагмент». Она содержит оптико-механическое сканирующее устройство, блок кодирования и обработки информации и устройство цифровой радиосвязи. Сканирующее устройство обеспечивает развертку изображения земной поверхности поперек трассы полета в полосе 85 км одновременно в восьми диапазонах спектра: 0,4 ... 0,7; 0,5 ... 0,6; 0,6 ... 0,7; 0,7 ... 0,8; 0,8 ... 1,1; 1,2 ... 1,3; 1,5 ... 1,8; 2,1 ... 2,4 мкм. Линейный размер мгновенного поля зрения для первых пяти диапазонов составляет 80 м. Сканирующим элементом является колеблющееся перед объективом одногранное зеркало. Объектив фокусирует излучение на торцы световодов, с выхода которых через полосовые спектральные фильтры оно поступает на фотопреобразователи. Электрические сигналы кодируются и поступают в систему передачи данных.

§ 3.5. КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ

В контроле геометрических параметров производимой продукции заинтересованы прежде всего предприятия машиностроительного профиля. Хотя штангенциркуль и микрометрические инструменты по-прежнему широко используются на стадии контроля, переход к автоматизированным производствам, расширение числа измеряемых параметров, ужесточение требований к точности измерений стимулировали разработку новых методов и средств контроля размеров. Среди них наиболее эффективными оказались оптические методы (наряду с акустическими) [1]. Тепловые методы НК уступают оптическим по номенклатуре решаемых задач и точности получаемых результатов. Область их применения ограничена контролем размеров объектов, помещенных в непрозрачные для оптического излучения среды, и используемые при этом технические средства подобны оптико-электронным.

Классификация приборов контроля размеров, построенных на основе оптических методов НК, приведена на рис. 3.39. В отличие от принятой классификации [1] сюда включены приборы для контроля топографии ОК, поскольку в обоих случаях контролируются геометрические параметры. Рассмотреть принцип действия каждого из представленных на рис. 3.39 средств в рамках данного параграфа не представляется возможным. Поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением приборов, с помощью которых контролируемый размер оценивается по пространственному распределению коэффициента отражения (пропускания), либо по изменениям интерференционной картины, либо по измерению угла вращения плоскости поляризации излучения.



Рис. 3.39. Классификация приборов контроля размеров

Первая группа включает проекционные, фотокомпенсационные, фотоимпульсные и другие приборы. Сравнение изображения ОК с изображением образца (или его адекватным представлением) лежит в основе *проекционного способа* контроля. Принцип действия приборов, реализующих этот способ, поясняет рис. 3.40. Изображение ОК с помощью оптического элемента проецируется на экран. Изображение образцового ОК либо непосредственно наносится на экран, либо проецируется с помощью полупрозрачного зеркала. Для совмещения изображений используется предметный стол, на котором закреплен ОК (или образец *3*) и который может перемещаться регулировкой микровинтов. Сопоставление размеров производится многими способами, чаще всего подсчетом штрихов измерительной сетки, нанесенной или спроецированной на экран. Результат счета, соответствующий разности сравниваемых размеров, сопоставляется с заданными в документации на ОК уровнями отклонения. Если эта разность находится в допустимых границах, принимается решение о пригодности ОК. В противном случае его бракуют. Процесс контроля облегчается, если образцовый и контролируемый объекты проецируются на экране в разных цветах.

Достоинством описанного метода является возможность увеличения масштаба сравниваемых изображений, поскольку при этом повышается точность измерения. Выпускаемые проекционные приборы характеризуются увеличением в диапазоне от единиц до 1000 и более. Способ используется также для контроля профиля изделий сложной формы.

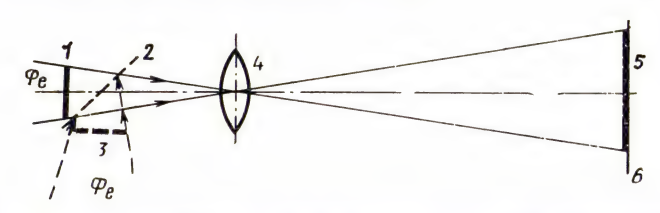


Рис. 3.40. К пояснению проекционного способа контроля размеров:
1 — ОК; *2* — полупрозрачное зеркало; *3* — образец; *4* — объектив; *5* — изображение ОК; *6* — проекционный экран

На сравнении световых потоков от ОК и образца и преобразовании пространственного светового импульса во временной сигнал с помощью развертывающих приемников основаны фотокомпенсационные и фотоимпульсные приборы. Работу фотокомпенсационного прибора поясняет рис. 3.41. Призма разделяет входной поток на два идентичных луча, один из которых

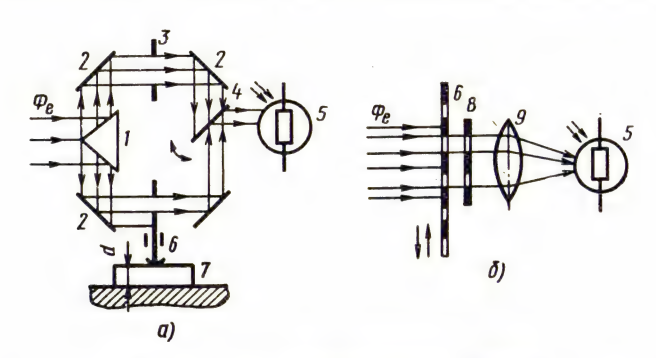


Рис. 3.41. Типы измерительных звеньев:
1 — призма; *2* — зеркало; *3* — эталонная щель; *4* — колеблющееся зеркало; *5* — приемник; *6* — измерительная щель; *7* — ОК; *8* — индикаторный растр; *9* — объектив

проходит через образцовую щель, другой — через измерительную щель, ширина которой определяется размером d контролируемого объекта. С помощью качающегося зеркала и приемника поток излучения обоих лучей преобразуется в электрические сигналы. Сравнивая сигналы, можно вынести суждение о том, насколько контролируемый размер d отличается от образцового.

Сравнение потоков в основном используется для контроля перемещений на базе растровых элементов. Изменение положения подвижного растра, закрепленного на перемещающихся частях объекта (например, станка), относительно неподвижного растра приводит к модуляции светового потока, регистрируемого приемником. Сигналом приемника осуществляется управление перемещающимися частями механизмов, станков. Аналогично работает звено с радиальными растрами, предназначенное для контроля угловых перемещений.

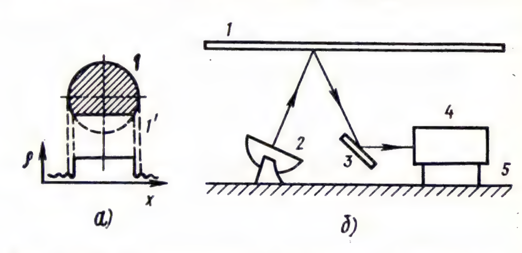


Рис. 3.42. К пояснению принципа преобразования светового импульса в электрический сигнал (*а*) и пример его использования (*б*):

1 — контактный провод; *1'* — изношенная часть провода; *2* — источник излучения; *3* — зеркало; *4* — развертывающий приемник с устройством обработки; *5* — крыша вагона

В приборах, преобразующих световой импульс в электрический сигнал (рис. 3.42), используется наличие скачка в распределении коэффициента отражения ρ по некоторому направлению x, что обусловлено присутствием ОК. Если в этом же направлении перемещается чувствительный элемент со скоростью v, то длительность импульса тока $t_и$ на его выходе связана с размером ОК $\Delta x = x_2 - x_1$ соотношением $\Delta x = t_и v$.

Примером использования этого прибора может служить контроль степени износа контактного провода электропоездов на железных дорогах за счет трения при взаимодействии с лыжей пантографа. Износ не должен превышать 30% первоначального диаметра. Контроль проводится с помощью оптико-электронной установки, размещаемой при испытаниях на крыше вагона (рис. 3.42, *б*). Область контакта провода с лыжей пантографа до блеска отшлифовывается, поэтому распределение коэффициента отражения ρ по поперечному сечению провода при наблюдении снизу имеет вид, показанный на рис. 3.42, *а*. Контроль проводят ночью, используя подсвечивающий источник и, при необходимости изменения направления отраженного луча, зеркало. Прибор обеспечивает контроль сечения провода через каждые 3 см при скоростях состава до 200 км/ч.

Наивысшая точность (сотые доли процента) измерения размеров приборами с использованием развертывающих приемников получена при кодировании изображений ОК путем наложения на них оптической дискретной сетки. Сетка создается волоконным кодирующим элементом. Изображение ОК проецируется на торец когерентного световода, противоположный торец которого находится в поле зрения развертывающего при-

емника. Число импульсов на выходе приемника от засвеченных волокон соответствует измеряемому размеру.

Поверхности изделий имеют шероховатости, возникающие при обработке материала инструментом. Они представляют случайные мелкоструктурные неровности. Несмотря на незначительную сравнительно с размерами изделия высоту неровностей, они оказывают существенное влияние на его эксплуатационные свойства. Мерой шероховатости служит класс чистоты. При увеличении высоты неровностей поверхности шариков на один класс долговечность подшипников снижается на 70%. Случайный характер неровностей и их малые размеры предопределили разработку специфических методов контроля шероховатости — рефлексометрического и интерферометрического.

Формулы (1.45) ... (1.47) положены в основу *рефлексометрического способа контроля.* Как следует из этих формул, коэффициент отражения излучения зависит от длины волны, углов падения и отражения, среднего квадратического отклонения высоты неровностей. Представляя формулы (1.45) в виде

$$\sigma_l = \sqrt{(-\ln \rho_э)\,\lambda^2/(4\pi \cos)\,\beta^2} \text{ или}$$

$$R_a = \sqrt{(-\ln \rho_э)\,\lambda^2/(5\pi \cos \beta)^2} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^{n} |l_i|,$$

можно оценить погрешность при измерении $[\rho_э = \rho_s(\beta)/\rho(\beta)]$.

Инструментальная погрешность измерения относительного коэффициента зеркального отражения для современных приборов составляет 0,5 ... 5%. Погрешность измерения используемой длины волны с помощью монохроматора составляет 1 ... 2 нм, а угла падения с применением гониометров с круговой шкалой — 5′. С учетом значений этих погрешностей и того обстоятельства, что образец сравнения также не обладает идеально гладкой поверхностью, общая погрешность рефлектометрического способа находится в пределах 5 ... 10%.

Схема простейшего оптического прибора для измерения шероховатости — рефрактометра — приведена на рис. 3.43. Сравниваемый или исследуемый образец поочередно подводится на позицию контроля, освещаемую через объектив и полупрозрачное зеркало лучами, почти нормальными к ее поверхности. Отраженный свет фокусируется объективом на приемник, связанный с вычислительным блоком, в котором вычисляются значения σ_l или R_a по формуле (1.45). С помощью лучших приборов, построенных по этой схеме, обеспечивается измерение R_a в пределах 0,005 ... 0,02 мкм (диапазон колебаний коэффициента отражения составляет 0,55 ... 1). Для R_a=0,02 мкм погрешность измерения оценивается 8%, для R_a=0,006 мкм — 20%.

Приборы, в основу которых положено явление интерферен-

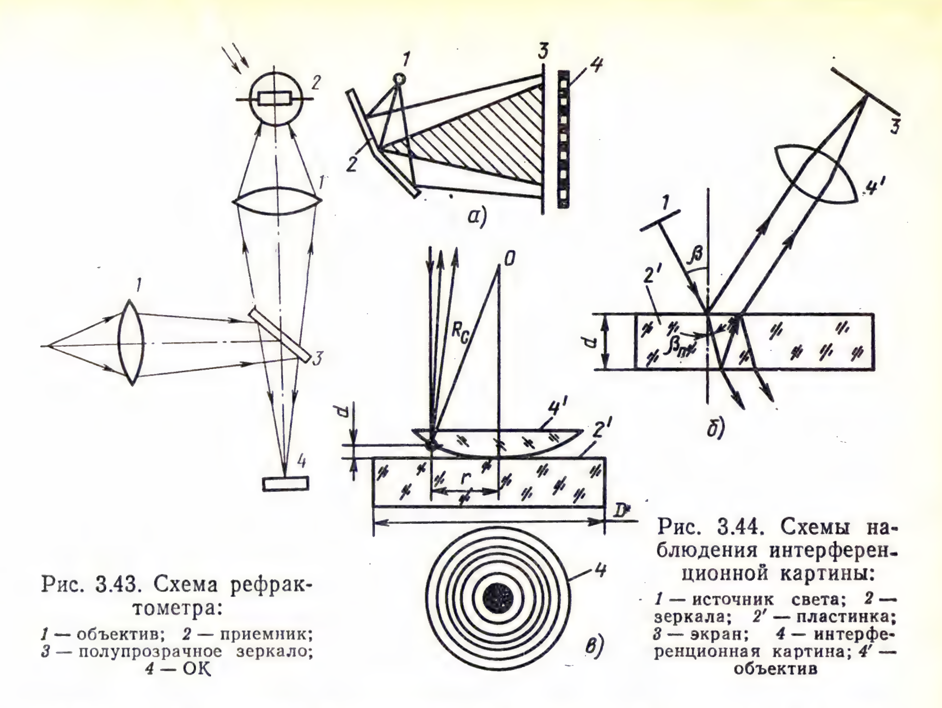


Рис. 3.43. Схема рефрактометра:

1 — объектив; *2* — приемник; *3* — полупрозрачное зеркало; *4* — ОК

Рис. 3.44. Схемы наблюдения интерференционной картины:

1 — источник света; *2* — зеркала; *2'* — пластинка; *3* — экран; *4* — интерференционная картина; *4'* — объектив

ции света, позволяют проводить измерения размеров в диапазоне от долей микрометра до 10 м и более с высокой точностью. Для создания интерференции волн необходимо получить две когерентные волны и свести их в некоторую область пространства. Классический способ получения когерентных пучков сводится к отражению лучей точечного источника от двух плоских зеркал, расположенных под углом, близким к 180° (рис. 3.44, *а*). Интерференционная картина на экране — это чередующиеся темные и светлые полосы, причем центральную светлую полосу образуют лучи с нулевой разностью хода. Номера интерференционных полос по обе стороны от центрального максимума называются порядком интерференции. Максимумы освещенности наблюдаются при разности хода лучей $\Delta = k\lambda$, минимумы — при $\Delta = (2k+1)\lambda/2$, $k = 0, 1, 2, \ldots$ Поэтому при использовании источника монохроматического света формируются темные и светлые полосы, освещение белым светом дает систему чередующихся цветных полос.

Ширина полос $b_п$ пропорциональна длине волны λ и обратно пропорциональна синусу угла φ между лучами: $b_п = \lambda/\sin\varphi$. При $\varphi = 1'$, $\lambda = 0{,}6$ мкм ширина полос $b_п = 2$ мм. Условие $\Delta = \lambda$ означает смещение полос на расстояние $b_п$.

Применение точечного источника приводит к образованию нелокализованной интерференционной картины в любой обла-

сти пространства, где интерферирующие пучки пересекаются. При замене точечного источника протяженным интерференционная картина локализуется в ограниченной области пространства.

При другом способе получения интерференционной картины используют тонкие пластинки (рис. 3.44, *б*). Луч монохроматического источника излучения после отражения от внешней и внутренней поверхностей пластинки разделяется на два параллельных луча, между которыми возникает разность хода

$$\Delta = 2dn\cos\beta_{п} + \lambda/2.$$

Разность хода определяется толщиной пластинки d, ее показателем преломления n и углом преломления $\beta_{п}$. Изменение любой из этих величин приводит к смещению интерференционных полос. При точности измерения смещения полос 10% обеспечивается погрешность измерения изменений толщины пластинки d, равная 0,03 мкм. Если $nd = \text{const}$, интерференцию наблюдают в фокальной плоскости *3* линзы *4'*. Каждая точка полосы (названы полосами равного наклона) образуется лучами, падающими на пластинку под одинаковыми углами β. Если n и β постоянны, а толщина d меняется, полосы (названы полосами равной толщины) соответствуют тем частям пластинки, оптическая толщина которых nd постоянна.

Интерференцию можно наблюдать в пластине, ограниченной сферической поверхностью (рис. 3.44, *в*). Воздушная прослойка между пластиной *2'* и линзой *4* имеет переменную толщину. Поэтому интерференционные полосы имеют форму концентрических колец, называемых кольцами Ньютона. Радиус k-го кольца $r_k = \sqrt{k\lambda R_{с}}$. Число колец $[N_k = D^2/(4\lambda R_{с})]$, наблюдаемых на поверхности диаметром D, определяется радиусом сферы $R_{с}$.

Описанные принципы формирования интерференционной картины положены в основу работы интерферометров, предназначенных для контроля размеров ОК.

Многолучевой интерференционный микроскоп МИИ-1 предназначен для измерения толщины тонких пленок и глубины поверхностных дефектов. В предметной плоскости микроскопа находится ОК (рис. 3.45, *а*). Осветитель (на чертеже не показан) формирует параллельный пучок лучей, который светоделителем направляется на исследуемую поверхность, часть которой не имеет покрытия ($l_{п} = 0$). С помощью микроскопа наблюдают возникающую интерференционную картину. Толщину покрытия $l_{п}$ измеряют по расстоянию между полосами d' с помощью окулярного микрометра (окуляра, перемещаемого с помощью микрометрических винтов) микроскопа: $l_{п} = \lambda d'/2b_{п}$. Пределы измерения 0,05...1 мкм. Погрешность измерения со-

ставляет 0,005 мкм. Аналогично находится глубина дефектов (высота бугра или ямы на исследуемой поверхности).

Схема рис. 3.45, *б* используется для контроля диаметров шариков путем сравнения с образцовой мерой. Мера — измерительная пластинка *4* — притерта к нижней пластинке *3*. Рядом с ней устанавливается контролируемый шарик или цилиндр. Сверху сравниваемые объекты также накрываются стеклянной

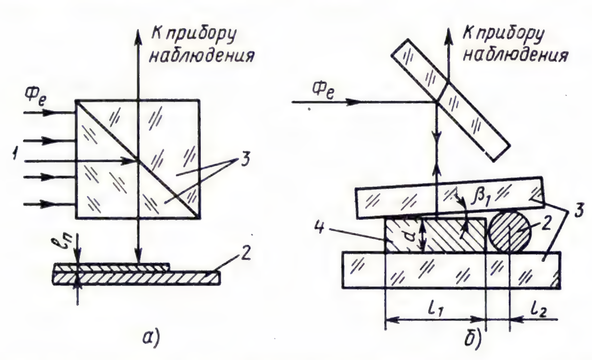


Рис. 3.45. Схемы установок для контроля толщины покрытий (*а*) и диаметра шариков (*б*):

1 — параллельный пучок лучей; *2* — испытываемая деталь; *3* — стеклянные пластины; *4* — измерительная пластина

пластинкой. С помощью светоделительной пластинки параллельный пучок монохроматического света направляется на меру. При различных диаметре шарика и толщине меры образуется воздушный клин, и на поверхности меры возникают интерференционные полосы. В случае, показанном на рис. 3.45, *б*, число наблюдаемых полос $N_1 = 2\beta_1 l_1/\lambda = 2(D-d)l_1/[(l_1+l_2)\lambda]$, где β_1 — угол клина; d — толщина меры; D — диаметр шарика. Если $D<d$, число полос $N_2 = 2\beta_2 l_2/\lambda = 2(d-D)l_1/(l_2\lambda)$. Искомая разность размеров $D-d$ находится по известным размерам l_1, l_2 и числу полос. Погрешность измерения прибора определяется в основном погрешностями измерения расстояний l_1 и l_2 и колеблется в диапазоне 0,1 ... 0,3 мкм.

Лучшие параметры имеет интерферометр ИЗК-57. Среднеквадратическое значение погрешности измерения диаметра шариков и цилиндров при сравнении их с образцовой мерой колеблется от 0,03 до 0,05 мкм.

В особую группу объединены приборы, называемые нутромерами. Они предназначены для контроля диаметров прецизионных цилиндрических пар (цилиндр — поршень), аттестации образцовых колец и других целей. Основное требование, предъявляемое к ним,— обеспечение погрешности измерения менее 0,1 мкм. Принцип работы таких интерферометров иллюстрирует рис. 3.46.

Цилиндрическая пробка, диаметр которой D_0 аттестован с точностью до 0,07 мкм, вставляется в контролируемое отверстие в прозрачном материале (рис. 3.46, *а*) и прижимается к стенке отверстия. При освещении такой конструкции в воздушном зазоре наблюдается интерференционная картина, полосы которой параллельны образующей цилиндра. Число полос определяется размерами x_1 и x_2 и позволяет судить о том, насколько отличаются диаметры D и D_0.

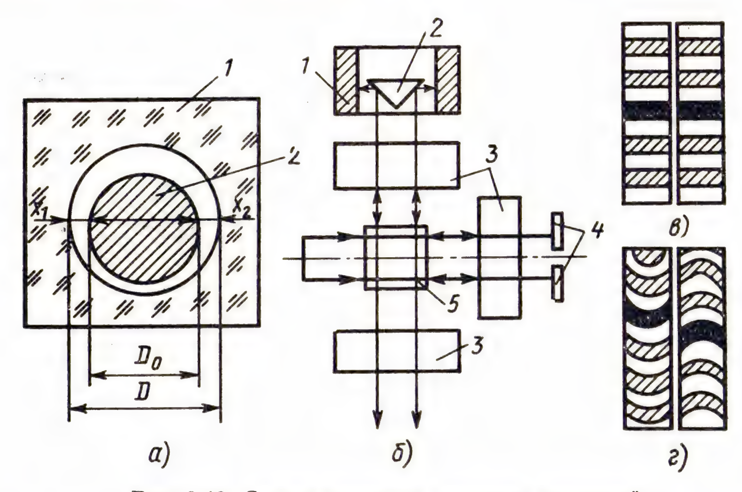


Рис. 3.46. Схемы контроля диаметра отверстий:

1 — ОК; *2* — измерительный элемент; *3* — оптические системы; *4* — отражающие зеркала; *5* — светоразделитель

В варианте на рис. 3.46, *б* параллельный пучок монохроматического света с помощью светоделителя *5* подается на измерительную призму и отражающие зеркала. Оптические системы служат для подфокусировки нутромера, компенсации разности фаз в каналах и выполнения других функций. Перед началом контроля на место ОК *1* устанавливается образцовая мера, и с помощью оптических систем проводится настройка схемы таким образом, чтобы на выходе нижней (на рисунке) оптической системы получилось изображение интерференционной картины в виде двух прямоугольников (рис. 3.46, *в*). При замене образцовой меры на ОК интерференционная картина не изменяется, если диаметр соответствует аттестованному. В противном случае полосы изгибаются и смещаются относительно средней линии (рис. 3.46, *г*). По прилагаемой к нутромеру методике измеряются искривления и смещения полос и по ним проводится расчет отклонения контролируемого параметра от расчетного. По схеме рис. 3.46, *а* построены приборы, обеспечивающие суммарную погрешность измерения около

0,1 мкм. Схема на рис. 3.46, *б* применена в нутромерах ИКМ-10, ИЗК-57, ИГ-88. Погрешность измерения приборов составляет 0,02 ... 0,03 мкм, диапазон контролируемых размеров 0,2 ... 200 мм.

Использование лазеров позволило решить ряд новых задач, например обеспечить измерение перемещений ОК до нескольких десятков метров с относительной погрешностью до 10^{-8}.

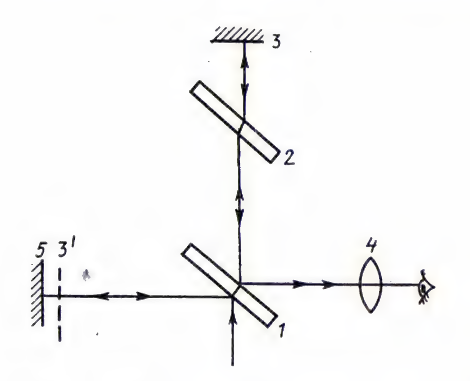


Рис. 3.47. Схема интерферометра Майкельсона:

1, 2 — стеклянные пластинки; *3, 5* — отражающие зеркала, *3'* — мнимое изображение зеркала *3*; *4* — окуляр

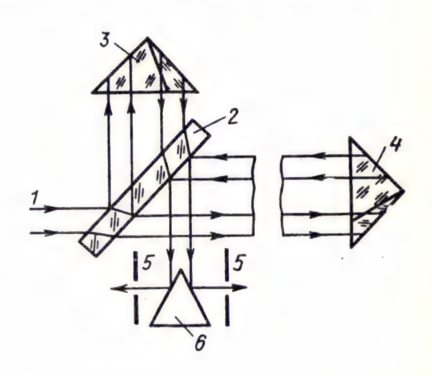


Рис. 3.48. Схема лазерного интерферометра для контроля больших перемещений:

1 — излучение лазера; *2* — разделяющая пластинка; *3, 4* — триппель-призмы; *5* — диафрагмы; *6* — призма

В большинстве лазерных приборов используется оптическая схема *интерферометра Майкельсона* (рис. 3.47). Луч света, проходя через полупрозрачные пластинки *1*, *2*, отражается от зеркала *3* и попадает в окуляр телескопа *4*. Другая составляющая луча отражается от зеркала *5* и, пройдя через пластинку *1*, формирует когерентную волну в поле наблюдения телескопа. Пластинка *2* служит для компенсации добавочной разности хода между лучами. Наблюдаемая интерференционная картина соответствует интерференции в воздушном слое, образованном зеркалом *5* и мнимым изображением *3'* зеркала *3*. Очевидно, перемещение зеркала *5* на четверть длины волны соответствует переходу светлой полосы на место темной, т. е. интерференционная картина перемещается в поле наблюдения при смещении зеркала *5* вдоль оптической оси. Число пересечений полосами некоторой визирной линии соответствует перемещению зеркала. На этом основаны высокоточные измерители перемещений с относительной погрешностью 10^{-6} ... 10^{-8}.

Следует отметить, что в таких приборах вместо пластинок использованы уголковые отражатели (триппель-призмы) (рис. 3.48).

Голографические интерферометры в ряде случаев имеют явные преимущества по сравнению с обычными интерферометрами аналогичного назначения. Сущность голографической интерферометрии рассмотрена в § 1.5.

Схема получения голограммы и последующего восстановления волнового фронта приведена на рис. 3.49, *а*. Поток лучей лазера расширяется телескопической системой и разделяется полупрозрачным зеркалом на опорный E_1 и рабочий E_2 поток, который после отражения от ОК сходится с E_1 на фотопластинке *5*. В результате интерференции на фотопластинке фиксируются прямые или (при волнистой поверхности ОК) искривленные полосы. Проявленная и зафиксированная фотопластинка — это голограмма. После установки ее в прежнее положение *5* она выступает в роли дифракционной решетки для волн E_1 и E_2. В направлении экрана *7* распространяются две параллельные и одинаковые волны: E_2 и дифракционная волна первого порядка E_3, возникающая при взаимодействии волны E_1 с голограммой. Интерференция их на экране *7* создает равномерную его освещенность. При изменении положения объекта возникают интерференционные полосы. Описанное явление положено в основу контроля деформации объектов.

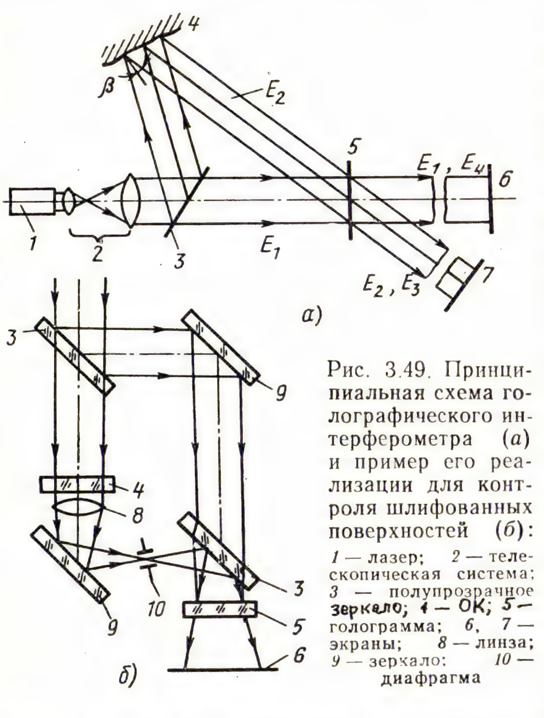


Рис. 3.49. Принципиальная схема голографического интерферометра (*а*) и пример его реализации для контроля шлифованных поверхностей (*б*):
1 — лазер; *2* — телескопическая система; *3* — полупрозрачное зеркало; *4* — ОК; *5* — голограмма; *6*, *7* — экраны; *8* — линза; *9* — зеркало; *10* — диафрагма

Если голограмма получена для образцового объекта, то поочередная установка контролируемых объектов в положение *4* позволяет оценить отклонение их размеров от требуемых. В частном случае, когда голограмма получена при установке в положение *4* образцового зеркала, при его замене объектом контроля наблюдаются полосы, искривление которых характеризует отличие контролируемой поверхности от образцовой: $l = l'\lambda/2b\cos\beta$, где l' — прогиб полосы; b — ее ширина; β — угол падения лучей на поверхность *4*.

Оптическая схема голографического интерферометра для контроля поверхностей в проходящем свете показана на рис. 3.49, *б*. Параллельный монохроматический пучок проходит через ОК и с помощью оптических элементов *8, 9, 10, 3* направ-

ляется на голограмму 5. Опорный пучок формируется элементами 3, 9, 4 и также направляется на голограмму. На экране 6 наблюдается интерференционная картина. Голограмму получают при установке в положение 4 пластины с отполированными поверхностями. Форма интерференционных полос повторяет профиль поверхности ОК. Погрешность измерения голографических интерферометров достигает 0,05 мкм.

Области применения интерферометров разнообразны. В настоящее время в основном с их помощью проводится высокоточный контроль размеров объектов самого различного вида, начиная от микронеровностей поверхности (шероховатости) и кончая деталями больших диаметров.

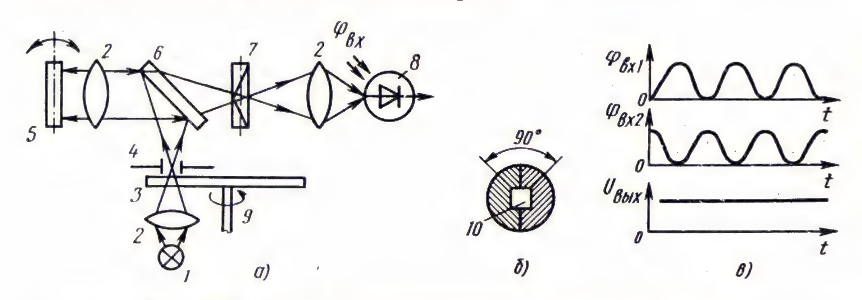


Рис. 3.50. Схема поляризационного измерителя углов:

1 — источник света; *2* — фокусирующие элементы; *3* — линейный поляризатор; *4* — плоская щель; *5* — зеркало; *6* — светоделитель; *7* — составной анализатор; *8* — приемник; *9* — ось двигателя; *10* — изображение щели на анализаторе

Поляризационные приборы для контроля размеров позволяют более точно замерить разность хода лучей, так как поляризационные элементы позволяют перейти от линейных измерений к угловым. Современными приборами угол поворота плоскости поляризации измеряется с погрешностью не более 30″, что соответствует разности хода лучей около $2 \cdot 10^{-3}$ λ. На этом принципе построены *поляризационные интерферометры*. Угол поворота плоскости поляризации выходящих лучей в этих приборах определяется разностью оптических длин ветвей интерферометра Δ: $\varphi = 2\pi\Delta/\lambda$. Разность хода Δ формируется перемещением ОК.

Для контроля толщины диэлектрических прозрачных пленок используют *лазерные эллипсометры*. Отраженные от внутренней и наружной поверхностей пленки лучи имеют разность хода, что связано с поворотом плоскости поляризации в оптической системе. На сегодняшний день известны приборы, позволяющие при точности отсчета углов около 0,1° проводить измерение толщины покрытий в диапазоне 0,01 ... 1,6 мкм с погрешностью 0,01 мкм.

Все более широкое распространение получают измерители углов, основанные на использовании поляризованного света. Принцип действия таких приборов можно пояснить с помощью схемы, представленной на рис. 3.50, *а*. Свет от источника фокусируется конденсором в плоскости щели. Перед щелью установлен линейный поляризатор, приводимый во вращение двигателем. Светоделитель направляет поток через объектив на зеркало 5. Отраженные от зеркала лучи через анализатор попадают на приемник. Анализатор выполнен в виде двух линейных поляризаторов, плоскости пропускания которых перпендикулярны друг другу (рис. 3.50, *б*). На выходе щели свет линейно поляризован, плоскость его поляризации вращается. Изображение щели *10* в

плоскости анализатора симметрично относительно линии соединения линейных поляризаторов, модулированные компоненты светового потока *11*, *12* на выходе анализатора сдвинуты относительно друг друга на 90°. В результате сложения этих компонент электрический сигнал на выходе приемника содержит только постоянную составляющую и не изменяется. При повороте зеркала *5* на некоторый угол смещается изображение щели *10* в плоскости анализатора, амплитуды компонентов светового потока *11*, *12* становятся различными, на выходе приемника появляется переменный сигнал, пропорциональный углу поворота зеркала. Фаза сигнала характеризует знак угла поворота. Достигнутая точность измерения составляет 0,2″ в диапазоне измеряемых углов 7,5′.

Рассмотренные принципы и средства контроля размеров дают представление о состоянии разработок в этой области, хотя здесь и не представлены все идеи, используемые для построения приборов указанного назначения.

Контрольные вопросы

3.5.1. Перечислите способы контроля размеров, основанные на анализе пространственного распределения отраженного излучения.

3.5.2. Какие принципы положены в основу рефлексометрического и интерферометрического способов контроля шероховатости поверхности?

3.5.3. Объясните принцип действия голографического интерферометра.

3.5.4. Перечислите преимущества поляризационных приборов для контроля размеров.

§ 3.6. КОНТРОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

Тепловой контроль включает определение теплофизических параметров материалов, выявление дефектов в многослойных объектах, контроль состояния внутренних источников тепла. Качественно эти вопросы рассмотрены в § 1.2, где, в частности, отмечалось, что носителем информации о внутренней структуре ОК служит тепловой поток. Для его возникновения в среде необходимо наличие температурного градиента, определяемого первой производной температуры по нормали к изотермической поверхности. Уравнение теплопроводности имеет вид $q_п = -\lambda^т \operatorname{grad} T$, где $q_п$ — плотность теплового потока; $\lambda^т$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), характеризующий способность ОК проводить тепло.

Теплопроводность газов и паров в основном обусловлена переносом кинетической энергии движения молекул ($\lambda^т = 0{,}006 \dots 0{,}6$ Вт/м·К), в твердых телах — переносом энергии свободных электронов и колебаниями кристаллической решетки. Для чистых металлов определяющая роль принадлежит электронной составляющей [$\lambda^т = 7 \dots 420$ Вт/(м·К)], для диэлектриков — фотонной [$\lambda^т = 0{,}02 \dots 3$ Вт/(м·К)]. Распространение тепла в жидкостях происходит по типу упругих колебаний аналогично распространению звука [$\lambda^т = 0{,}07 \dots 0{,}7$ Вт/(м·К)].

Сомножитель $\operatorname{grad} T$ выражается через градиент внутренней энергии тела $W_т$: $\operatorname{grad} T = (c_в \gamma_в)^{-1} \operatorname{grad} W_т$, где $c_в$ — удель-

ная теплоемкость ОК, Дж/(кг·К); $\gamma_в$ — плотность ОК, кг/м³. Тогда уравнение теплопроводности можно представить в виде $q_п = -a \operatorname{grad} W_т$, где $a = \lambda^т/c_в\gamma_в$ — коэффициент температуропроводности (м²/с), характеризующий перенос или диффузию внутренней энергии тела.

Параметры $\lambda^т$, $\gamma_в$, a определяют теплофизические свойства тел, их способность аккумулировать и передавать тепловую энергию и подлежат контролю на соответствие значениям, заданным нормативной документацией. Изменение этих параметров в локальной области объема ОК считается дефектом, обнаружение которого относится к задачам дефектоскопии.

Температурное поле ОК описывается в общем виде дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla^2 T + q_v (c_в\gamma_в)^{-1}, \tag{3.11}$$

где $\nabla^2 = (\partial^2/\partial x^2) + (\partial^2/\partial y^2) + (\partial^2/\partial z^2)$ — оператор Лапласа; q_v — мощность внутреннего источника тепла, Вт/м³; t — время. Для решения уравнения (3.11) необходимо задать начальное распределение температуры $T(x, y, z, t=0)$ в ОК, его геометрию и изменения температуры (плотности потоков энергии) на границах раздела сред. Совокупность таких решений для объектов в виде пластины, цилиндра, шара: $T(x, y, z, t) = f(a, \lambda^т, q_v)$ составляет теоретическую базу теплового контроля. Они связывают интересующие параметры объекта с температурным откликом, возникающим при воздействии на объект специально сформированным тепловым полем: импульсным, изотермическим поверхностным, гармоническим и т. д. Вид воздействия лежит в основе классификации методов контроля параметров $\lambda^т$, $c_в$, a и *тепловой активности* $\sqrt{\lambda^т c_в \gamma_в}$, где $\gamma_в$ — плотность вещества. Пространственное распределение этих параметров позволяет решить вопрос о наличии или отсутствии дефектов в ОК.

Температурный отклик на тепловое воздействие регистрируется термочувствительными датчиками, введенными внутрь ОК или установленными на его поверхности. По такой схеме построено большинство известных приборов для определения теплофизических параметров.

Методы и средства, в которых используется излучение, имеют меньшую точность измерения. Однако бесконтактный способ воздействия и съема информации открывает возможность проведения контроля в процессе производства и эксплуатации изделий, т. е. позволяет решить ряд новых задач, которые приобретают в последнее время все большую актуальность. Некоторые из существующих методов этой группы рассмотрены ниже.

Метод импульсного воздействия. Если в однородной изотропной среде с начальной температурой $T(x, 0) = 0$ в плоскости $y0z$ (рис. 3.51, *а*) сформировать мгновенный тепловой импульс энергетической плотностью q, то изменение температуры в этой среде описывается известным выражением

$$T(x, t) = [q/(2\sqrt{\pi\lambda^{т}c_{в}\gamma_{в}t})]\exp[-x^2/(4at)]. \qquad (3.12)$$

Из (3.12) следует, что для определения тепловой активности $\sqrt{\lambda^{т}c_{в}\gamma_{в}}$ достаточно измерить температуру в каком-либо изотермическом сечении x_0 и провести необходимые вычисления.

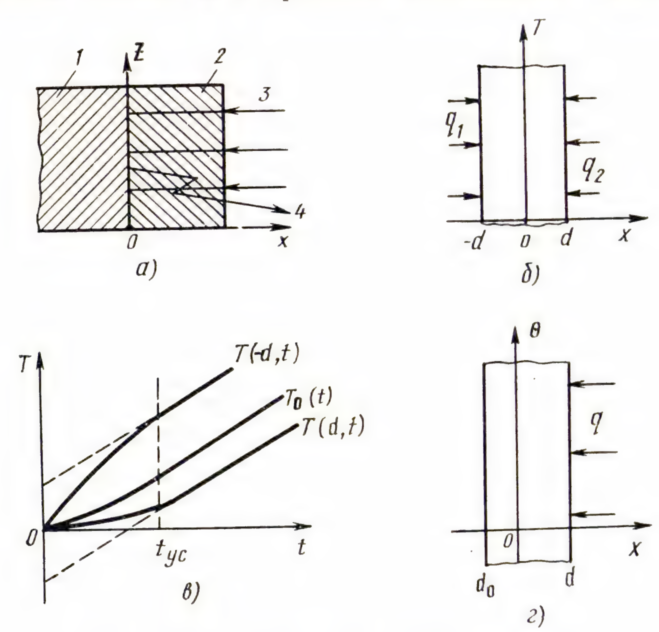


Рис. 3.51. К пояснению способов контроля теплофизических параметров:

1 — ОК; *2* — образцовый объект; *3* — нагревающее излучение; *4* — собственное излучение ОК

Практическую реализацию описанного метода проиллюстрируем на примере (рис. 3.51, *а*). Объект контроля вводится в тепловой контакт с телом *2* с известными теплофизическими параметрами $\lambda^{т}{}_{c}$, $c_{вс}$, a_c, $\gamma_{вс}$ и прозрачным для излучения, например в области 3...5 мкм. На короткое время включается источник, генерирующий излучение в этом диапазоне длин волн. Излучение, пройдя без ослабления образец, поглощается поверхностью ОК. При выключении источника по собственному излучению ОК в диапазоне 3...5 мкм определяется температура

$$T(0,\ t)=q_с \Big/ \sqrt{\pi\lambda^т_с c_{вс}\gamma_{вс}}=(q-q_c)/\sqrt{\pi\lambda^т c_в\gamma_в t},$$

а через нее искомая тепловая активность

$$\sqrt{\lambda^т c_в\gamma_в}=q/[T(0,\ t)\sqrt{\pi t}]-\sqrt{\lambda^т_с c_{вс}\gamma_{вс}},$$

где q_c и $q—q_c$ — плотность потока в образце и исследуемом теле.

Те же результаты могут быть получены и без образцового тела, если контроль проводится при непрерывном облучении поверхности ОК — метод воздействия постоянной мощностью. При работе в режиме постоянной мощности температура источника в 2 раза и более должна превышать температуру поверхности ОК, поскольку плотность потока излучения

$$M_e=\varepsilon_{\Delta\lambda}h_Б\left(T^4_{ист}-T^4_{ок}\right)\simeq\varepsilon_{\Delta\lambda}h_Б T^4_{ист},$$

где $T_{ист}$ и $T_{ок}$ — соответственно температура источника и объекта контроля; $h_Б$ — постоянная Стефана — Больцмана. В температурном поле, наводимом излучением в ОК, выделяют несколько стадий, определяемых значением *критерия Фурье* $Fo=at/d$: начальную ($Fo<0{,}2$); переходную ($Fo\simeq 0{,}2$); регулярную ($0{,}2<Fo<0{,}5$); квазистационарную ($Fo>0{,}5$). В информационном отношении стадии не равноценны. Это следует учитывать при проектировании систем контроля.

В простейшем случае, когда полупространство с равномерной начальной температурой облучается потоком $M_e(\lambda)$, температура поверхности ОК изменяется по закону

$$T(0,\ t)=2q\sqrt{at}/\sqrt{\pi}\lambda^т,\quad q=\int\limits_{\Delta\lambda}\alpha_\lambda M_e(\lambda)\,d\lambda.$$

Тогда

$$\sqrt{\lambda^т c_в\gamma_в}=2q\sqrt{t}\,/\sqrt{\pi}T(0,\ t).$$

Температура поверхности пластины толщиной $2d$ (рис. 3.51) с равномерным начальным температурным полем, облучаемой с обеих сторон постоянными потоками, с различными плотностями энергии при $Fo>0{,}5$ описывается выражением

$$T(x,\ t)=T_0(t)-(q_1+q_2)\,x/(2\lambda^т)+(q_1-q_2)\,x^2/(4\lambda^т d), \qquad (3.13)$$

где $T_0(t)=T(0,\ t_{ус})+(q_1-q_2)(t-t_{ус})/(2c_в\gamma_в d)$, $t>t_{ус}$; q_1 и q_2 — плотности тепловых потоков, проникающих через грани $x=-d$, $x=d$; $t_{ус}$ — время установления постоянной скорости разогрева (рис. 3.51, *в*). Решение (3.13) позволяет найти перепад температур в пластине

$$\Delta T(x)=T(x,\ t)-T_0(t)=-(q_1+q_2)\,x/(2\lambda^т)+bx^2/2a, \qquad (3.14)$$

где $b=(q_1-q_2)/(2c_в\gamma_в d)$. В соответствии с выражением (3.14) в установившемся режиме ($t>t_{ус}$) можно определить значения

коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости:

$$\lambda^т = (q_1 + q_2) d / [T(-d, t) - T(d, t)], \quad c_в = (q_1 - q_2)/(2\gamma_в d b).$$

Если нагрев пластины осуществляется только потоком q_1, а поток $q_2 = 0$, то учитывая фундаментальное соотношение $\lambda^т = a c_в \gamma_в$, получаем

$$\lambda^т = q_1 d / [T(-d, t) - T(d, t)], \quad c_в = q_1 / \gamma_в 2d \, [dT(-d, t)/\mathrm{d}, t],$$

$$a = [dT(-d, T)/dt] \, d / [T(-d, t) - T(d, t)].$$

В последние годы для контроля теплофизических параметров получают распространение *гармонические методы воздействия.* В их основе лежат закономерности распространения гармонического теплового потока в ОК.

Гармонические воздействия осуществляются различными способами. В конвективном способе исследуемый участок поверхности принудительно омывается средой, необходимый закон изменения температуры которой формируется специальным теплообменником. Знакопеременный тепловой поток позволяет создать полупроводниковые термоэлектрические батареи, питаемые синусоидальным током (эффект Пельтье). Пульсирующие потоки одного направления создаются на базе электрических и оптических источников.

При теоретическом анализе результатов взаимодействия гармонического потока теплоты с твердым телом установлено, что распределение температуры в теле подобно распределению смещения колеблющихся точек при распространении волнового процесса в упругой среде. Иными словами, температура в любой точке тела колеблется с частотой нагревающего потока с определенным смещением по фазе. Для количественной оценки параметров этих колебаний достаточно рассмотреть простой случай, когда температура среды, окружающей полуограниченное тело, изменяется по закону

$$T_в(t) = T_{в0} + T_{вm} \cos 2\pi f t.$$

Распределение относительной температуры в теле в этом случае описывается выражением

$$\theta = \frac{T(x, t) - T_{в0}}{T_{вm}} = T_{0m} \exp\left(-x\sqrt{\frac{\pi f}{a}}\right) \cos\left[2\pi f t - x\sqrt{\frac{\pi f}{a}} - \operatorname{arctg}\left(1 + \frac{\zeta}{\lambda^т}\sqrt{\frac{a}{\pi f}}\right)^{-1}\right], \qquad (3.15)$$

где T_{0m} — амплитуда колебаний на поверхности ОК;

$$T_{0m} = \left(1 + \frac{2\lambda^т}{\zeta}\sqrt{\frac{\pi f}{a}} + 2\pi (\lambda^т)^2 \frac{f}{a\zeta^2}\right)^{-0,5};$$

ζ — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К). Расстояние между точками, колебания в которых отличаются по фазе на угол 2π, называют длиной тепловой волны $\Lambda_т = 2\sqrt{\pi a/f}$, а скорость распространения волны находится из выражения $v_т = 2\sqrt{\pi a f}$.

В фиксированный момент времени распределение относительной температуры θ по глубине ОК подобно изображенному на графике рис. 3.52, *а*. Штриховые кривые показывают уменьшение размаха колебаний с ростом глубины x. Изменение относительной температуры во времени в различных точках ОК иллюстрирует рис. 3.52, *б*.

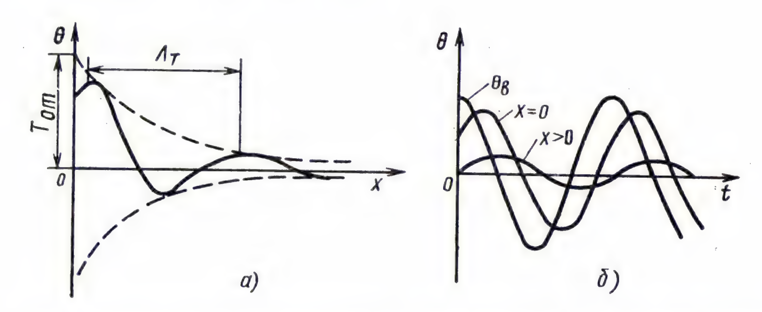


Рис. 3.52. Распределение относительной температуры по глубине ОК в фиксированный момент времени (*а*) и ее изменение во времени в различных точках ОК (*б*)

Полезно привести некоторые количественные данные. При облучении бетона ($a = 0{,}49 \cdot 10^{-6}$ м²/с) гармоническим тепловым потоком с частотой $f = 1$ Гц длина тепловой волны $\lambda^т = 1{,}73$ мм; при $f = 10$ Гц — 0,55 мм. Аналогично для алюминия — 33 и 10 мм. На расстоянии, равном $\Lambda_т$ от поверхности ОК, тепловая волна практически полностью затухает; ослабление примерно 500 раз, на расстоянии $0{,}1\Lambda_т$ — почти в два раза. При гармоническом воздействии на поверхность полуограниченного тела ($x = 0$) тепловым потоком $q = q_0 \cos 2\pi f t$ переменная составляющая температуры

$$\theta' = T(0,\ t) - T_0 = \left(q_0 / \sqrt{\lambda^т c_в \gamma_в \cdot 2\pi f}\right) \cos(2\pi f - \pi/4). \qquad (3.16)$$

Выражение (3.16) позволяет определить тепловую активность тела $\sqrt{\lambda^т c_в \gamma_в} = q_0/\theta'_{max}\sqrt{2\pi f}$, где θ'_{max} — амплитуда колебаний температуры на поверхности полуограниченного тела.

При воздействии того же потока на пластину толщиной d фазовый сдвиг температурной волны на противоположной поверхности ($x = 0$)

$$\varphi_d = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{ch} y \cdot \sin y + \operatorname{sh} y \cdot \cos y}{\operatorname{ch} y \cdot \sin y - \operatorname{sh} y \cdot \cos y}, \qquad (3.17)$$

где $y=\sqrt{\omega d^2/2a}$. Выражения (3.15)—(3.17) позволяют рассчитать основные параметры приборов контроля температуропроводности.

Известно несколько методов контроля параметров $\lambda^т$, $c_в$, a с использованием двухслойных плоских систем в виде двух находящихся в хорошем тепловом контакте пластин (см. рис. 3.51, *г*). Одна пластина (обычно металлическая) толщиной d_0 имеет объемную теплоемкость $c_{в0}\gamma_{в0}$, и условно принимается, что она имеет бесконечную теплопроводность. Другая пластина толщиной d имеет теплоемкость $c_в\gamma_в$ и малую теплопроводность. Если на поверхность второй пластины действует гармонический тепловой поток $q=q_0\cos(2\pi ft)$, а открытая поверхность металлической пластины теплоизолирована от окружающей среды, то колебания температуры в системе описываются зависимостью вида

$$\theta(x, t)=(q_0 d/\lambda^т)\, f(x)\cos[2\pi ft+\varphi(x)],$$

где $f(x)$, $\varphi(x)$ — функции, определяющие затухание амплитуды и фазовый сдвиг колебаний при распространении в системе. В общем виде выражения для $f(x)$ и $\varphi(x)$ громоздки. В частном случае, когда $(c_в\gamma_в d/c_{в0}\gamma_{в0}d_0)\gg 1$ (тонкая металлическая пластинка), для грани $x=d$ получены соотношения:

$$f(x=d)=\frac{1}{\sqrt{2y}}\left[\frac{(\sin y)^2(\mathrm{sh}\, y)^2+(\cos y)^2(\mathrm{ch}\, y)^2}{(\sin y)^2(\mathrm{ch}\, y)^2+(\mathrm{sh}\, y)^2(\cos y)^2}\right]^{0,5}, \quad (3.18)$$

$$\varphi(x=d)=\mathrm{arctg}\,\frac{\sin y\cdot\cos y+\mathrm{sh}\, y\cdot\mathrm{ch}\, y}{\sin y\cdot\cos y-\mathrm{sh}\, y\cdot\mathrm{ch}\, y}. \quad (3.19)$$

Выражения (3.18) и (3.19) связывают значение функций $f(x=d)$, $\varphi(x=d)$ с коэффициентом температуропроводности $a=\pi f\mathrm{d}^2/y^2$.

В другом частном случае — тонкая теплоизоляционная пленка на массивной металлической пластине $[(c_в\gamma_в d/c_{в0}\gamma_{в0}d_0)\ll 1]$, искомые функции имеют вид

$$f(x=d)=\frac{1}{\sqrt{2y}}\left[\frac{(\sin y)^2(\mathrm{ch}\, y)^2+(\cos y)^2(\mathrm{sh}\, y)^2}{(\sin y)^2(\mathrm{sh}\, y)^2+(\cos y)^2(\mathrm{ch}\, y)^2}\right]^{0,5},$$

$$\varphi(x=d)=\mathrm{arctg}\,\frac{\sin y\cdot\cos y-\mathrm{sh}\, y\cdot\mathrm{ch}\, y}{\sin y\cdot\cos y+\mathrm{sh}\, y\cdot\mathrm{ch}\, y}.$$

При малых частотах колебаний $f(y=\sqrt{2\pi fd^2/2a}\ll 1)$ они существенно упрощаются:

$$f(x=d)=1-5y^4/12, \quad \varphi(x=d)=\mathrm{arctg}\left[\frac{2}{3}y^2\left(1-\frac{y^4}{12}\right)\right]. \quad (3.20)$$

На базе двухслойных систем разработано несколько вариантов приборов измерения коэффициентов тепло- и температуро-

проводности. Если соблюдены условия $(c_в\gamma_в d/c_{в0}\gamma_{в0}d_0)\simeq 0{,}01$ и $y^2\simeq 0{,}1$, то из (3.20) следует

$$a=2\pi f d^2/3\cdot|\varphi(x=d)|,\quad \lambda^т=q_0[d/f(x=d)][1-(5\pi^2 f^2 d^2/a^2)].$$

Проведение опытов на двух частотах $(f_1<f_2)$ при выполнении условий $(c_в\gamma_в d/c_{в0}\gamma_{в0}d_0)\leqslant 0{,}01$, $y\leqslant 0{,}1)$ позволяет определить искомые параметры по амплитудам колебаний температуры внешней поверхности $\theta(x=d,\ f_1)$ и $\theta(x=d,\ f_2)$:

$$a=d^2\sqrt{\frac{5\,[(2\pi f_2)^2-(2\pi f_1)^2]\,\theta(x=d,\ f_2)}{\theta(x=d,\ f_1)-\theta(x=d,\ f_2)}},$$

$$\lambda^т=q_0[d/\theta(x=d,\ f_1)]\ (1-u_a),$$

где $u_a=[\theta(x=d,\ f_1)-\theta(x=d,\ f_2)]f_1^2/\theta(x=d,\ f_2)\,(f_2^2-f_1^2)$.

Метрологической базой для их аттестации могут служить стандартные измерители, основанные на контактном принципе регистрации температурного отклика.

Чтобы получить представление о возможностях выпускаемых приборов, приведем краткую сводку параметров некоторых из них. Измеритель ИТЭМ-1 предназначен для массовых экспресс-измерений теплопроводности $\lambda^т$ металлов, сплавов, полупроводников и теплоизоляторов в диапазоне 0,2 ... 80 Вт/(м·К). Требования к образцам: диаметр 15 мм, высота 1 ... 40 мм, максимальная погрешность измерения 10%, продолжительность одного испытания 1 ... 2 мин.

Образцовый цифровой измеритель теплопроводности ИТО-20 предназначен для аттестации образцовых мер с $\lambda^т=0{,}1\ ...\ 5$ Вт/(м·К). Диаметр рабочих образцов 15 мм, высота 1 ... 10 мм, погрешность измерения 2,5%, продолжительность измерения 3 ... 5 мин.

Цифровой прибор ИТС-$ac_в\lambda$-20 применяется для измерения температуропроводности, удельной теплоемкости и теплопроводности твердых материалов с $\lambda^т=0{,}1\ ...\ 5$ Вт/(м·К) на образцах диаметром 40 мм и высотой 4 ... 20 мм. Продолжительность измерения 3 ... 5 мин, погрешность измерения каждого параметра 7%.

Измеритель ТФП-5 используется для массовых измерений температуропроводности твердых материалов с $\lambda^т=(0{,}08\ ...\ 1{,}7)\cdot 10^{-6}$ м²/с на образцах диаметром 20 мм и высотой 4 ... 15 мм. Продолжительность измерения 3 ... 5 мин, погрешность измерения 5%.

Измеритель ИТА-$c\lambda$-400 предназначен для прямого измерения температурных зависимостей $\lambda^т(T)$ и $c_в(T)$ твердых материалов с $\lambda^т=0{,}2\ ...\ 20$ Вт/(м·К) в диапазоне от —150 до 400 °С. В качестве образцов используются цилиндры высотой 5 ... 40 мм и диаметром 20 мм, погрешность измерения не превышает 5%.

Другой класс задач связан с обнаружением внутренних дефектов в ОК. С теплофизической точки зрения дефект есть локальное изменение параметров $\lambda^т$, a, $c_в$ в некоторой точке тела $(x,\ y,\ z)$. Это может быть несцепление в некоторой области покрытия с основным материалом, наличие воздушных пор или более твердых включений в ОК и т. д.

Рис. 3.53 иллюстрирует принцип обнаружения внутренних дефектов активным методом. Дефект *2* имеет иную, чем объект контроля *1*, теплопроводность. Тепловой поток $q_п$, формирую-

щийся в ОК под воздействием нагревающего потока M_e, распространяясь вглубь, обтекает дефект. Это сопровождается повышением температуры поверхности ($z=0$) в области над дефектом и понижением ее на противоположной поверхности

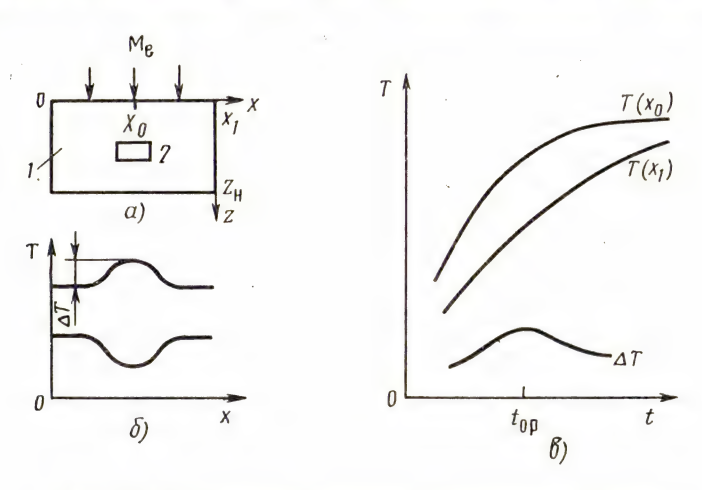


Рис. 3.53. К пояснению принципа обнаружения дефектов

($z=z_н$). По разности температур $\Delta T=T(x_0, z=z_н)-T(x_1, z=z_н)$ и $\Delta T=T(x_0, z=0)-T(x_1, z=0)$ можно судить, имеется ли локальная неоднородность в ОК (рис. 3.53, *а, б*). Сигнал $\Delta T(t)$ меняется во времени. Характер изменения сигнала имеет вид выпуклой функции с максимумом в некоторой точке $t_{0р}$ (рис. 3.53, *в*).

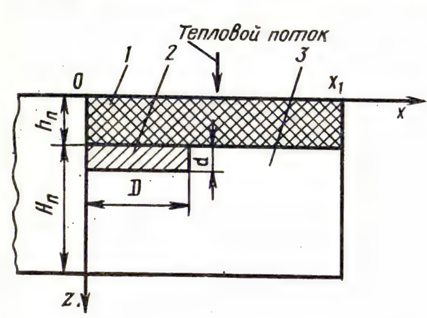


Рис. 3.54. Геометрия задачи:
1 — покрытие; *2* — полость; *3* — подложка

При пассивном контроле температура ОК отличается от температуры окружающей среды. В процессе выравнивания температур наличие дефекта проявляется в формировании в течение некоторого времени локального выброса на температурном поле. Пассивным является и обнаружение локальных источников теплоты, возникающих в процессе эксплуатации изделий (например, выявление мест короткого замыкания проводников на печатных платах).

Аналитическое описание температурных полей ОК с внутренними дефектами (внутренними источниками теплоты) затруднено. На практике конкретные модели исследуют на ЭВМ численными методами.

Технику проведения таких исследований поясним на примере расчета температуры конструкции, выполненной в виде покрытия, нанесенного на подложку при наличии несцепления (рис. 3.54). Уравнение (3.16) для этого случая имеет вид

$$\begin{aligned}
&\partial T_1/\partial t = a_4\nabla^2 T_1, && x = 0 - x_1, && z = 0 - h_{\text{п}}, \\
&\partial T_2/\partial t = a_2\nabla^2 T_2, && x = 0 - D, && z = h_{\text{п}} - (h_{\text{п}} + d), \\
&\partial T_3/\partial t = a_3\nabla^2 T_3, && x = 0 - D, && z = (h_{\text{п}} + d) - (H_{\text{п}} + h_{\text{п}}), \\
& && x = D - x_1 && z = h_{\text{п}} - (H_{\text{п}} + h_{\text{п}}),
\end{aligned} \tag{3.21}$$

где a_i, T_i — коэффициент температуропроводности и температура i-й области,

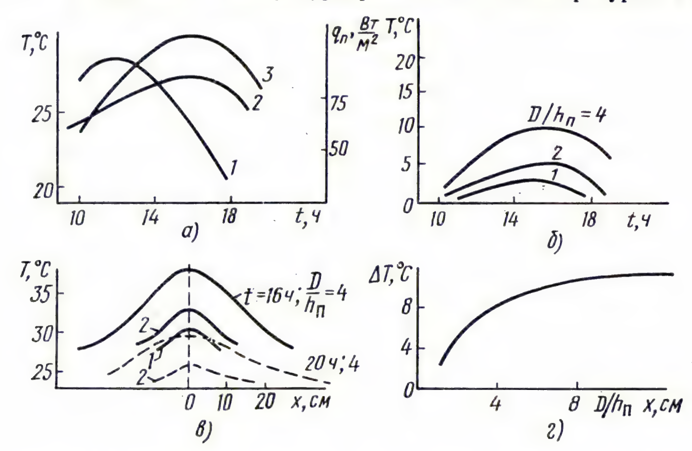


Рис. 3.55. Результаты расчета температуры объекта рис. 3.54:

а — изменение потока тепла *1* и температуры поверхности покрытия в бездефектной *2* и дефектной *3* областях; *б* — изменение перепада температур на поверхности и в области дефекта; *в* — изменение температуры поверхности покрытий в направлении x (июль); *г* — изменение максимального перепада температур $\Delta T = T(x=0,\ D/h_{\text{п}}) - T(x = x_1,\ D/h_{\text{п}})$

В качестве граничных условий принимаем периодический ход теплового потока через поверхность и равенство тепловых потоков и температур на границах смежных областей:

$$q_{\text{п}}(t) = q_0 \sin \omega t;$$

$$\lambda_1^{\text{т}} \partial T_1/\partial z = q_{\text{п}}(t), \ z = 0, \ 0 \leqslant x \leqslant x_1;$$

$$\lambda_1^{\text{т}} \partial T_1/\partial z = \lambda_2^{\text{т}} \partial T_2/\partial z, \ T_1(z = h_{\text{п}}) = T_2(z = h_{\text{п}});$$

$$\lambda_2^{\text{т}} \partial T_2/\partial z = \lambda_3^{\text{т}} \partial T_3/\partial z, \ T_2(z = h_{\text{п}} + \mathrm{d}, \ x = 0 - D) =$$

$$= T_3(z = h_{\text{п}} + d, \ x = 0 - D);$$

$$T_2[z = h_{\text{п}} - h_{\text{п}} + d), \ x = D)] = T_3(z = h_{\text{п}} \ldots h_{\text{п}} + d, \ x = D);$$

$$\lambda_1^{\text{т}} \partial T/\partial z = \lambda_3^{\text{т}} \partial T_3/\partial z, \ T_1(z = h_{\text{п}}, \ x = D - x_1) =$$
$$= T_3(z = h_{\text{п}}, x = D - x_1),$$

$$\partial T/\partial z = 0, \ z = H_{\text{п}}, \ x = 0 - x_1, \ \partial^2 T/\partial z^2 = 0, \ z = H_{\text{п}}, \ x = 0 - x_1, \tag{3.22}$$

где $\lambda_i^{\text{т}}$ — коэффициент теплопроводности,

Результаты решения задачи (3.21), (3.22) численным методом при $\lambda_1^{т}=1{,}55$; $\lambda_2^{т}=2{,}59$; $\lambda_3^{т}=1{,}13$ Вт/(м·К); $c_{в1}=0{,}84$; $c_{в2}=1{,}05$; $c_{в3}=2{,}09$ кДж/(кг·К); $\gamma_{в1}=2000$; $\gamma_{в2}=1{,}205$; $\gamma_{в3}=1650$ кг/м³; $q_0=100$ Вт/м²; $d=0{,}1$ м приведены на рис. 3.55.

Из анализа кривых можно сделать важный вывод. Сигнал ΔT зависит от отношения глубины дефекта к его поперечным размерам, причем эта зависимость близка нарастающей экспоненте. Если указанное отношение больше шести, изменения ΔT практически не происходят и амплитуда ожидаемого сигнала может быть найдена аналитически как разность решений для двухслойной одномерной модели, нижний слой которой выступает в роли дефекта, и полуограниченного тела.

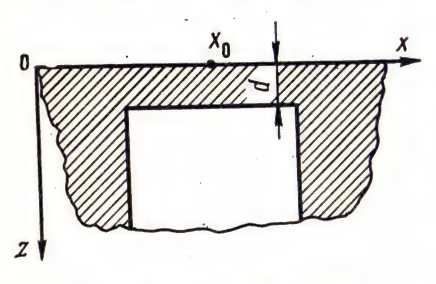


Рис. 3.56. Геометрия задачи

Действительно, рассмотрим полуограниченное тело, в котором имеется полость, отделенная от поверхности ОК стенкой толщиной d (рис. 3.56). Требуется определить приращение температуры над полостью в точке x_0 относительно температуры удаленного от нее участка при начальном условии $T(z,\ 0)=T_0$, если начиная с момента $t=0$ через поверхность ОК проходит тепловой поток, который можно представить в виде степенно́го полинома и линейной функции температуры поверхности:

$$q_{л}(t) = -\lambda^{т}\frac{\partial\theta(z,\ t)}{\partial z} = \sum_{\nu=0}^{m} S_{\nu}(t)^{\nu} - N\theta(0,\ t),$$

$$\theta(z,\ t) = T(z,\ t) - T_0. \tag{3.23}$$

Найдем решение уравнения $a\partial^2\theta(z,\ t)/\partial z^2 = \partial\theta(z,\ t)/\partial t$ при граничном условии (3.23) и дополнительном условии $\theta(\infty,\ t)=0$ и решения уравнений

$$a\partial^2\theta_1(z,\ t)/\partial z^2 = \partial\theta_1(z,\ t)/\partial t, \qquad -d<z<0;$$

$$a_{п}\partial^2\theta_2(z,\ t)/\partial z^2 = \partial\theta_2(z,\ t)/\partial t, \qquad z>0,$$

при следующих условиях:

$$\theta_1(z,\ 0) = \theta_2(z,\ 0) = 0, \quad \theta_1(0,\ t) = \theta_2(0,\ t), \quad \theta_2(\infty,\ t) = 0,$$

$$\lambda_1^{т}\partial\theta_1(0,\ z)/\partial z = \lambda_2^{т}\partial\theta_2(0,\ z)/\partial z,$$

$$\lambda_1^{т}\partial\theta_1(-d,\ t)/\partial z = \sum_{\nu=0}^{m} S_{\nu}t^{\nu} - N\theta_1(-\mathrm{d},\ t).$$

Используя операционный метод преобразования Лапласа, получим искомый результат в виде

$$\Delta T(t) = \frac{S_0}{N}\frac{\Omega_a-1}{\Omega_a+1}\left\{-\exp\left[\left(\frac{N}{\lambda_1^{т}}\right)^2 a_1 t + \frac{N}{\lambda_1^{т}}d\right]\mathrm{erfc}\left(\frac{N}{\lambda_1^{т}}\sqrt{a_1 t} + \frac{\mathrm{d}}{\sqrt{a_1 t}}\right) + \mathrm{erfc}\,0\right\},$$

где $\Omega_a = \sqrt{\lambda_1^{т}c_{в1}\gamma_{в1}/\lambda_2^{т}c_{в2}\gamma_{в2}}$; индекс 2 относится к полости.

Полученное выражение использовалось, в частности, для оценки амплитуды ожидаемого сигнала ΔT в случае отслоения верхнего слоя в аэродромных и асфальтобетонных покрытиях.

Структурная схема теплового дефектоскопа включает источник излучения и приемник излучения, связанный с регистрирующей схемой. Может быть использована любая комбинация из описанных в § 3.2 и 3.3 источников и приемников излучения. При этом следует позаботиться, чтобы приемник был чувствителен к тепловому излучению.

Основной недостаток приборов рассматриваемого класса проистекает из заложенного в них принципа регистрации амплитудной информации. Реальные поверхности выступают в роли источника помех, обусловленных флуктуациями коэффициентов поглощения поверхности нагревающего потока и излучения. Помехи затрудняют интерпретацию зарегистрированной картины, ограничивают чувствительность метода, а их устранение сопряжено со значительными трудностями. Все это объясняет интерес, который проявляется в последние годы к выделению «фазовой» информации, формирующейся при распространении тепловых волн в ОК. Возможности выделения этой информации поясним на двух примерах.

1. В образцах с нанесенным покрытием тепловая волна частично «отражается» от границы раздела сред и возвращается к наружной поверхности. Параметр $\rho_т = (1 - \Omega_a)/(1 + \Omega_a)$, где $\Omega_a = [\gamma_в c_в \lambda_в{}^т/(\gamma_п c_п \lambda_п{}^т)]^{0,5}$ количественно характеризует процесс взаимодействия волн с границей покрытие — подложка. Здесь $\gamma_{в/п}$, $c_{в/п}$, $\lambda^т{}_{в/п}$ — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности подложки/покрытия. Для ряда композиций коэффициент $\rho_т$ может достигать больших значений. Так, для медного покрытия на текстолите $\rho_т \approx 0{,}96$, для резиновой пленки на стальном образце $\rho_т \approx -0{,}96$. Знак минус означает, что подложка «отсасывает» тепловую энергию из покрытия, т. е. выступает в роли стока тепла.

Появление «отраженной» волны меняет температурное поле на поверхности ОК. Вместо (3.15) для ОК с покрытием справедливо выражение

$$\theta(0,\ t) = T_{0m}\left[\cos(2\pi f t - \varphi) + \rho_т \exp\left(-2d_п \sqrt{\frac{\pi f}{a}}\right)\cos\left(2\pi f t - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \varphi - 2d_п \sqrt{\frac{\pi f}{a}}\right)\right], \qquad \varphi = \operatorname{arctg}\left(1 + \frac{\zeta}{\lambda^т}\sqrt{\frac{a}{\pi f}}\right)^{-1}. \qquad (3.24)$$

В результате сложения двух волн одной частоты возникает картина, которую можно назвать «тепловой интерференционной». Она зависит от значения $\rho_т$. Для отслоений коэффициент $\rho_т$ имеет максимальное значение, приближающееся к единице.

В месте дефекта наблюдается характерное искажение температурного поля.

Зависимость амплитуды и фазы результирующей волны $\theta(0, t)$ от толщины покрытия $d_п$ используется для бесконтактного контроля его толщины. Выражение для скорости распространения волны $v_т = 2\sqrt{\pi a f}$ служит основой метода контроля коэффициента температуропроводности a.

Метод «тепловой интерферометрии» находится в стадии разработки. Структурная схема созданных на его основе экспериментальных приборов близка изображенной на рис. 3.57. В качестве источника нагревающего потока обычно используют лазер *1* мощностью в несколько ватт. Длину волны излучения лазера следует подобрать таким образом, чтобы она находилась вне полосы спектральной чувствительности приемной системы *6*. Удачным считается сочетание: $\lambda_1 = 0{,}4 \dots 1$ мкм для лазера, $\lambda_2 = 8 \dots 14$ мкм для приемника. Модулированный поток $q_{\lambda 1}$ вызывает в ОК *3* тепловые волны, которые преобразуются приемной системой в электрический сигнал. Двухфазный синхронный усилитель *7* выделяет амплитуду и фазу входного сигнала, анализ которых проводится в микропроцессоре *5*. После принятия решения о параметрах контролируемой области формируется сигнал управления шаговым приводом *4*, и в поле контроля подводится новая область объекта. В ряде установок предусмотрено управление частотой модулятора *2* для оптимизации режима испытаний.

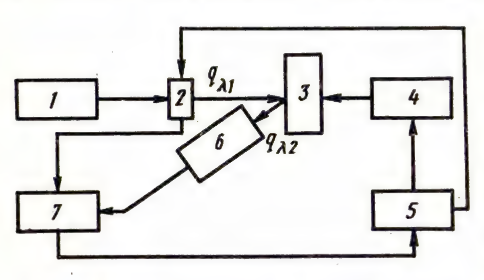


Рис. 3.57. Структурная схема экспериментальной установки для наблюдения «тепловой интерференции»:

1 — лазер ($\Phi_e = 10$ Вт; $\lambda = 0{,}55$ мкм); *2* — модулятор; *3* — ОК; *4* — шаговый привод; *5* — микропроцессор; *6* — оптико-электронный преобразователь; *7* — синхронный усилитель

2. Следует, хотя бы коротко, остановиться на структурной схеме другого прибора, отличающегося схемой регистрации тепловой картины. Здесь используется так называемый «эффект миража» для преобразования температурного распределения на поверхности ОК в электрический (или другой, пригодный для дальнейшего использования) сигнал.

Известно, что в тонком слое воздуха, соприкасающемся с поверхностью твердого тела (пограничном слое), тепло распространяется преимущественно путем молекулярной теплопроводности. Распределение температуры в пограничном слое отражает распределение температуры на поверхности тела.

В табл. 3.15 приведены результаты опыта Рамдаса по измерению температуры в слое воздуха, соприкасающемся с ОК. Распределения температур воздуха на поверхности и вблизи нее подобны. При наличии температурного градиента создается градиент показателя преломления и оптический (зондирующий) луч в пограничном слое воздуха испытывает отклонение

Таблица 3.15

Распределение температур над поверхностью

Расстояние от нагретой поверхности, мм	0	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Температура, °С	87,6	82,0	79,6	77,4	74,0	71,2	68,8	66,6

от первоначального направления. Если плотность нагревающего потока (рис. 3.58, *а*) изменяется по синусоидальному закону, изменения направления зондирующего луча во времени отражают структуру формирующегося температурного поля поверхности покрытия. Картина на плоском экране (в плоскости приемника), установленном на пути зондирующего луча, опреде-

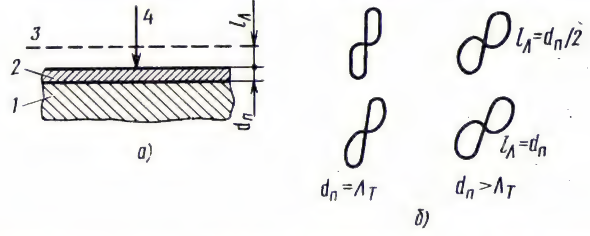


Рис. 3.58. Схема регистрации «эффекта миража» (*а*) и вид кривых, описываемых зондирующим лучом в плоскости приемника (*б*):

1 — подложка; *2* — покрытие; *3* — зондирующий луч; *4* — нагревающий луч

ляется частотой нагревающего потока (длиной тепловой волны $\Lambda_т = 2\sqrt{\pi a/f}$), толщиной покрытия $d_п$, расстоянием луча от поверхности ОК $l_л$ (рис. 3.58, *б*). Фиксируя фигуру, выписываемую зондирующим лучом для контрольного образца, и сравнивая ее с фигурами для испытываемых образцов при неизменных частоте f и расстоянии $l_л$, можно судить об отклонениях контролируемых параметров (толщины покрытия $d_п$ и коэффициента температуропроводности a) от установленных значений.

Возвращаясь к уравнению (3.16), можно видеть, что температурное поле позволяет получить информацию не только о теплофизических параметрах ОК, но и о наличии в нем источников тепла q_v. Это обстоятельство лежит в основе другого направления теплового контроля — обнаружения скрытых источников энергии. Рассмотрим некоторые задачи, решаемые в рамках указанного направления.

Дистанционный поиск полезных ископаемых. Физической основой метода служит искажение залежью полезных ископаемых глубинного теплового потока и генерация ею тепловой энергии. Так, теплопроводность сульфидных руд 8 ... 10 Вт/(м·К) в несколько раз выше теплопроводности слагающих оболочку пород, а процесс их оксидирования сопровождается значительным тепловыделением (примерно $5 \cdot 10^6$ Дж/кг исходного продукта). В результате действия этих факторов температура земной поверхности изменяется на доли градуса. Сопутствующие неоднородности температурного поля (формируемого в поверхностном слое земли солнечной радиацией), имеющие на тепловых снимках вид светлых и темных пятен произвольной формы, затрудняют выделение полезного сигнала от залежи. Тем не менее региональная оценка продуктивности неисследованных областей тепловым методом считается эффективной, так как позволяет существенно сократить в последующем объем наземных работ при сравнительно низких затратах на проведение тепловой разведки.

Диагностика рака. Тепловизоры зарекомендовали себя как надежное средство обнаружения злокачественных опухолей на ранних стадиях заболевания. Опухоль характеризуется более интенсивным обменом веществ, что приводит к повышению ее температуры на несколько градусов по сравнению с температурой окружающих участков. Клинические опыты показали наличие корреляции между ростом температуры и степенью развития опухоли. Следует отметить, что применение инфракрасных методов диагностики ограничено кругом поверхностных либо подкожных заболеваний и успешно для обнаружения рака молочной железы, определения границ ожогов и обморожений, изучения ревматоидных артритов. Эффективность применения тепловизоров мала при обнаружении воспаленного аппендикса.

Контроль изделий электронной техники (ИЭТ). Во многих ИЭТ до 90% расходуемой энергии преобразуется в теплоту, в результате температура элементов и деталей устройства повышается. При превышении ею некоторого порога надежность изделия снижается. Причины, приводящие к отличию тепловых режимов ИЭТ от расчетных, разнообразны. Так, конструкция резистора и его номинальная мощность рассчитываются при допущении, что 20% выделяющейся тепловой энергии рассеивается в пространстве, а 40% должно отводиться за счет теплопроводности. Нарушение этих условий может привести к перегреву не только самого резистора, но и окружающих его элементов. Тепловое изображение позволяет выявить ошибки конструирования ИЭТ и отступления от технологии их изготовления. Типичная схема контроля включает несколько операций: получение температурного поля заведомо годного ОК (образцового), построение температурного поля каждого вновь изготовленного изделия того же типа, последовательное сравнение получаемых полей с образцовым, принятие решения о пригодности проверяемых ОК к эксплуатации.

В заключение следует отметить, что теоретические вопросы теплового контроля излучениями проработаны достаточно глубоко. Однако накопленные в теории результаты для решения практических задач используются незначительно.

Контрольные вопросы

3.6.1. Перечислите задачи, решаемые с использованием методов теплового контроля.

3.6.2. В чем сущность гармонических методов контроля теплофизических параметров ОК?

3.6.3. Поясните принцип обнаружения внутренних дефектов активным и пассивным тепловыми методами.

3.6.4. В чем сущность «эффекта миража»?

§ 3.7. КОНТРОЛЬ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ

В основе методов оптического контроля состава веществ лежат законы Био, Бугера, Кирхгофа и др. Приборы, реализующие эти методы, называют анализаторами. По принципу действия они делятся на абсорбционные, интерферометрические, поляризационные, эмиссионные и люминесцентные, по назначению — на газоанализаторы, анализаторы жидких и твердых сред.

Абсорбционные приборы основаны на поглощении исследуемым веществом лучистой энергии в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра. В соответствии с законом Бугера (1.48) плотность потока энергии, прошедшего через ОК излучения, изменяется по экспоненциальному закону $(J/J_0)_\lambda = \exp(-\alpha_{\lambda п} d)$ и зависит от длины волны. Вид функции $\alpha_{\lambda п} = f(\lambda)$ отражает атомно-молекулярное строение вещества.

В задачах контроля конкретной примеси в ОК ограничиваются измерением одного параметра $\alpha_{\lambda и п}$ на длине волны $\lambda_и$:

$$\alpha_{\lambda и п} = -\frac{1}{d} \ln\left(\frac{J}{J_0}\right)_\lambda.$$

Для исключения влияния на результат измерения рассеивающих свойств веществ применяют двухволновую схему. Длина волны излучения второго (опорного) канала не совпадает с полосой поглощения $\lambda_и$ и находится вблизи нее. Отношение сигналов на выходе опорного и измерительного каналов не зависит от стабильности параметров источника и приемника излучения. Если, например, облучать газовую смесь излучением на опорной и измерительной длинах волн, то прошедшие через нее потоки соответственно равны:

$$J_{\lambda 0} = J_0 \exp(-\alpha_{\lambda 0 п} d), \qquad J_{\lambda и} = J_0 \exp(-\alpha_{\lambda и п} d - \alpha'_{\lambda и} d),$$

где $\alpha'_{\lambda и п}$ — коэффициент поглощения контролируемой компоненты газа в полосе поглощения. Поскольку $\lambda_и \approx \lambda_0$, $\alpha_{\lambda и п} = \alpha_{\lambda 0 п}$, логарифм отношения регистрируемых потоков $\ln(J_{\lambda и}/J_{\lambda 0}) = -\alpha_{\lambda и п} d$. Коэффициент поглощения связан с концентрацией газа: $\alpha'_{\lambda и п} = A_{Б \lambda и} c_р$, где $A_{Б \lambda и}$ — коэффициент, не зависящий от концентрации газа $c_р$ и характеризующий поглощающие свойства ОК. Тогда $c_р = -\ln(J_{\lambda и}/J_0)/dA_{Б \lambda и}$.

Рассмотренный принцип контроля газовых смесей и жидких растворов положен в основу работы многочисленных анализаторов.

Абсорбционные газоанализаторы широко распространены в различных отраслях промышленности. Среди них следует выделить оптико-акустические газоанализаторы, особенностью ко-

торых является наличие оптико-акустического приемника, представляющего замкнутый объем с исследуемым газом. Под воздействием проходящего излучения газ нагревается, давление в объеме растет. Изменение давления можно зарегистрировать соответствующим датчиком, например микрофоном.

Принцип действия газоанализаторов поясняет рис. 3.59. Непрерывный лучистый поток от источников преобразуется модулятором в импульсный и проходит через прозрачные стенки рабочей и компенсационной камер. В компенсационной камере и полостях приемника концентрация контролируемого газа в смеси соответствует установленным нормативной документацией. Через рабочую камеру прокачивается исследуемая смесь, и если она соответствует «норме», поглощение излучения в камерах и полостях приемника одинаково и мембрана микрофона остается неподвижной. Отклонение концентрации от «нормы» приводит к изменению плотности потоков, поглощаемых в полостях приемника излучений, и, как следствие, к колебанию мембраны. Эти колебания преобразуются в электрический сигнал, пропорциональный концентрации контролируемого компонента и регистрируемый измерительным прибором *9*.

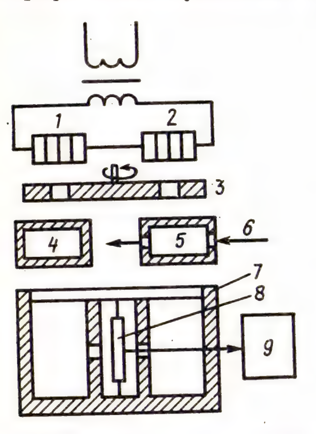


Рис. 3.59. Схема газоанализатора:

1, *2* — излучатели; *3* — модулятор; *4* — компенсационная камера; *5* — рабочая камера; *6* — анализируемый поток газа; *7* — приемник; *8* — конденсаторный микрофон; *9* — регистрирующий прибор

Рассмотренная схема характерна для газоанализаторов с непосредственным отсчетом. Разработаны также схемы с оптической, электрической и газовой компенсацией, в которых сигнал разбаланса компенсируется изменением плотности потока одного из лучей (оптическим или электрическим способом) либо доведением концентрации исследуемой смеси до нормы. При равенстве выходного сигнала нулю оценивают компенсирующий сигнал, пропорциональный концентрации контролируемого компонента. В табл. 3.16 приведены параметры промышленных оптико-акустических газоанализаторов.

Аналогичные устройства используют также при контроле содержания различных компонентов в жидких средах, например *оптический влагомер,* отражающий характерные особенности приборов такого класса. Спектр поглощения воды в ближней инфракрасной области состоит из высших гармоник и комбинационных составляющих стандартных колебаний. В результате попадания воды в ОК меняется форма кривой $a_{\lambda п}=f(\lambda)$. На рис. 3.60, *а* приведены спектральные характеристики погло-

щения сухого и увлажненного (около 9% H_2O) вещества. Длину волны сигнала в измерительном канале можно выбрать равной 1,9 мкм, в опорном — 1,7 или 1,8 мкм.

Таблица 3.16

Параметры оптико-акустических газоанализаторов

Тип прибора	Определяемые компоненты	Пределы измерений, % (наименьшая определяемая концентрация, %)	Погрешность, %
ОА 2109 (СССР)	CO	0 ... 1; 0 ... 2; 0 ... 5; 0 ... 10	±2,5
ОА 2209 (СССР)	CO_2	0 ... 20; 0 ... 30; 0 ... 50; 0 ... 70	±2,5
ОА 2309 (СССР)	CH_4	0 ... 100	±2,5
ГИП-7 (СССР)	CO_2, CH_4	0 ... 0,1; 0 ... 0,5; 0 ... 10; 0 ... 20	±5
«Урас» (ФРГ)	CO, CO_2, CH_4	(0,005; 0,05)	±3
«Ирга» (Англия)	CO, CH_4, CO_2, C_2H_2, O_2	(0,05; 0,01; 0,1)	±5
«Бекман» (США)	CO, CO_2, CH_4, C_2H_2, H_3	(0,0001)	±3

Схема влагомера приведена на рис. 3.60, *б*. Световой поток от источника проходит через кювету с контролируемым веществом. Разделение потока на измерительный и опорный осуществляется модулятором. Модулятор приводится во вращение

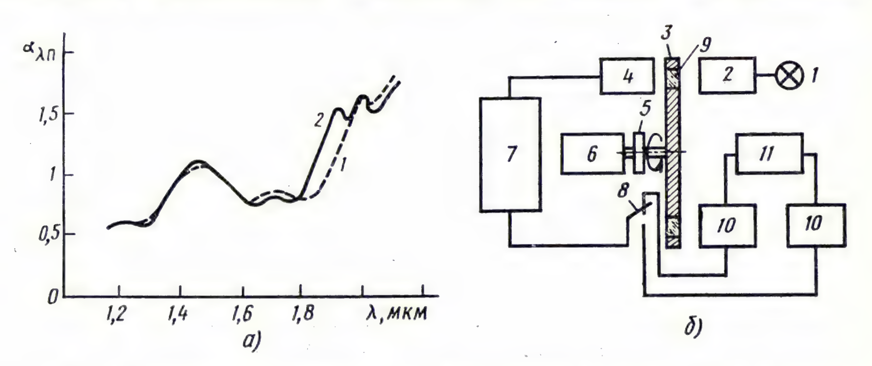


Рис. 3.60. Спектральные характеристики поглощения сухого (*1*) и влажного (*2*) вещества (*а*) и схема влагомера (*б*):

1 — источник света; *2* — кювета; *3* — модулятор; *4* — приемник; *5* — магнит; *6* — двигатель; *7* — усилитель; *8* — переключатель; *9* — интерференционные фильтры; *10* — накопительные схемы; *11* — регистрирующий прибор

двигателем и выполнен в виде диска с установленными измерительным и опорным интерференционным светофильтрами. Сигналы на выходе приемника представляют две серии импульсов, амплитуды которых пропорциональны излучению, прошед-

шему ОК на опорной и измерительной длинах волн. После усиления они разделяются (с помощью переключателя, управляемого магнитом) и подаются на накопительные схемы. Отношение двух напряжений формируется в регистрирующем приборе.

В табл. 3.17 приведены параметры ряда выпускаемых промышленностью жидкостных анализаторов.

Таблица 3.17

Параметры анализаторов

Тип	Модель	Контролируемая среда	Контролируемый компонент	Пределы измерения концентрации, %	Погрешность, %
Анализ-1	0101	Ацетон	Вода	0 ... 1	4
	0103	Метанол	»	0 ... 0,6	4
	0116	Этиловый спирт	»	4 ... 10	4
ИФО-453	—	Органические жидкости	»	0 ... 1	1
ЛИАЖ-1	—	Четыреххлористый углерод, циклогексанол	Циклогексанол	0 ... 15	1,5
ЛИМАС-Ф	—	Бензол, винилацетат, дихлорэтан, метанол, этанол, бутанол, этиленгликоль	Вода	0 ... 100	3

Анализаторы примесей в непрозрачных ОК построены на сопоставлении опорного и измерительного лучистых потоков. Коэффициент отражения ρ непрозрачных тел однозначно связан с коэффициентом поглощения, т. е. по информационному содержанию они равноценны.

На рис. 3.61 приведены кривые отношения отраженных потоков излучения на длинах волн 1,96 и 1,7 мкм в зависимости от влагосодержания $W_в$ для различных материалов. В диапазоне влажностей 0 ... 10% эти зависимости мало отличаются от линейных.

Развитием методов спектроскопии ОК по отраженному потоку может служить *метод нарушенного полного внутреннего отражения* (НПВО). Процесс отражения от границы раздела сред сопровождается частичным заходом излучения в менее плотную среду. Если эта среда является поглощающей, происходит ослабление потока, эффект полного внутреннего отражения нарушается ($\rho<1$). На этом принципе разработаны средства контроля состава веществ, показатель поглощения которых $0{,}05<\varkappa<1$.

Реализация метода НПВО требует применения специальных элементов. Обычно элемент представляет прозрачную оптиче-

скую деталь, которая обеспечивает полное внутреннее отражение излучения. ОК приводится в контакт с отражающей поверхностью элемента. НПВО регистрируется на различных длинах волн, по виду спектральной кривой отражения судят о наличии контролируемых компонентов в веществе. На рис. 3.62 приведена структурная схема устройства, используемого для контроля содержания воды в нефти. На модуляторе *2* установлены интерференционные фильтры, один из которых пропускает излучение в полосе поглощения воды, другой формирует опорный луч. Пластинка НПВО *3* смочена с обеих сторон анализируемой эмульсией *4*. После многократных отражений от границы пластинка — эмульсия излучение преобразуется в электрический сигнал приемником *5*. Отношение сигналов на измерительной и опорной длинах волн служит мерой содержания воды в нефти.

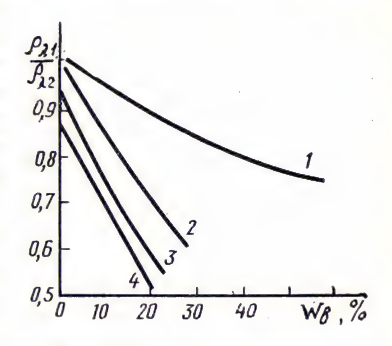


Рис. 3.61. Характеристики влагомера, работающего на отражение:

1 — кожа; *2* — бумага; *3* — байка; *4* — шерсть

В задачах анализа многокомпонентных смесей используют спектрометры и спектрофотометры. В отличие от рассмотренных анализаторов они предназначены для регистрации спектра поглощения (отражения) в большом диапазоне длин волн, охватывающем полосы поглощения компонентов, присутствие которых в веществе подлежит контролю.

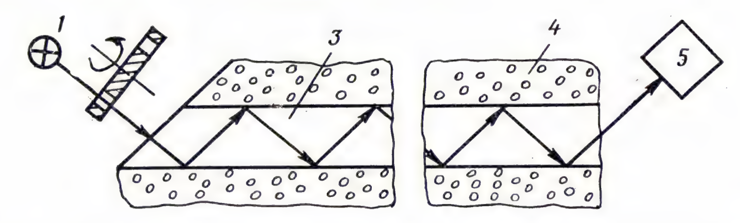


Рис. 3.62. Структурная схема прибора для контроля содержания воды в нефти:

1 — источник излучения; *2* — модулятор; *3* — элемент НПВО; *4* — контролируемая эмульсия; *5* — приемник

Спектрометры выполняют по однолучевой схеме с фотоэлектрической регистрацией спектра. Измерения проводят при непрерывном сканировании спектральных участков, выделяемых монохроматором. Спектрометры состоят из широкополосного источника излучения, монохроматора, приемника излучения, усилителя и отсчетного или регистрирующего устройства.

Спектрофотометры — это двухлучевые приборы, с помощью которых судят о составе вещества по результату сравнения двух монохроматических пучков, один из которых проходит через исследуемое вещество, другой — через контрольный образец. Последовательное изменение длины волны излучения позволяет получить спектральную кривую поглощения в интересующем диапазоне.

Спектральные приборы, выпускаемые отечественной промышленностью, охватывают весь диапазон частот оптических излучений, вплоть до 1 мм (ИКС-19). Основная группа приборов предназначена для анализа состава ОК в ближней и средней областях инфракрасного спектра (ИКС-14А, ИКС-16, ИКС-22, ИКС-24 и др.). Длительность записи одной спектральной кривой составляет здесь десятки минут, и это ограничивает область их применения исследовательскими задачами и проведением лабораторных анализов.

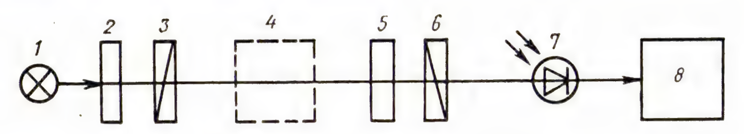


Рис. 3.63. Структурная схема поляриметра:
1 — источник света; *2* — фильтр; *3* — поляризатор; *4* — кювета; *5* — модулятор; *6* — анализатор; *7* — приемник; *8* — регистратор

Оптические излучения используют также для контроля концентрации частиц в газах и жидкостях (дым, эмульсии). При прохождении лучистого потока через такую среду происходит его рассеяние. Плотность потока рассеянного излучения в направлении зондирующего луча зависит от концентрации частиц, их размера, формы, коэффициентов преломления материала частиц и среды и подчиняется экспоненциальному закону. Приборы, применяемые для измерения и анализа этой составляющей излучения, называют *турбидиметрами*. Анализаторы дисперсных сред, основанные на измерении и анализе отраженного средой потока, называют *нефелометрами*.

Для контроля концентрации растворов сахара, никотина, камфары, кокаина и других веществ, обладающих свойством вращения плоскости поляризации, используют приборы, называемые *поляриметрами*. В основу работы приборов положен закон Био ($\varphi_р = \varphi_0 c_р d$), связывающий концентрацию $c_р$ активного вещества в растворе с углом поворота плоскости поляризации проходящего света $\varphi_р$. Структурная схема поляриметра приведена на рис. 3.63. Она включает последовательно установленные источник света, фильтр, поляризатор, кювету с исследуемым веществом, модулятор, анализатор, фотоприемник и регистратор. Назначение фильтра и поляризатора состоит в

получении монохроматического линейно поляризованного излучения, которое взаимодействует с исследуемым раствором в кювете и преобразуется анализатором в световой поток (в соответствии с *законом Малюса*):

$$\Phi_v = \Phi_{v0} (\cos^2 \beta + \tau_\perp),$$

где Φ_{v0} — световой поток на выходе поляризатора; β — угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора; $\tau_\perp$ — коэффициент пропускания поляризатора и анализатора при $\beta = 90°$.

Чтобы контролировать концентрацию интересующего раствора, поляризатор ориентируют под углом $\beta = 90°$, добиваясь минимума потока Φ_v. Затем на пути светового луча устанавливают кювету с исследуемым веществом и поворотом анализатора вновь находят минимальный поток $\Phi_{vp} = \Phi_{v0}[\cos^2 (\beta + \varphi_p) + \tau_\perp]$. Угол поворота анализатора соответствует углу вращения плоскости поляризации φ_p. В современных приборах погрешность его измерения составляет $\pm 0{,}02 \ldots 0{,}03°$ и определяется в основном малой чувствительностью фотоприемника в области гашения светового потока. Измеренный угол сравнивается с заданным в нормативной документации, и на основании этого сравнения делается вывод о пригодности раствора к дальнейшему использованию (необходимости довложения продукта или разбавления раствора).

В другом варианте прибора плоскость поляризации раскачивают с помощью модулятора, устанавливаемого перед кюветой. В результате световой поток на выходе анализатора изменяется в соответствии с выражением

$$\Phi_{vp} = \Phi_{v0} [\cos^2 (\beta + \varphi_p) + \varphi_a \sin (\omega t + \tau_\perp)],$$

где ω — частота качания; φ_a — амплитуда модуляции.

Процесс измерения φ_p несложно автоматизировать. При выборе параметров схемы пользуются выражением для чувствительности поляриметра

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{me\Delta f}{(m-1)\Phi_{v0}\eta_\lambda}\left(\frac{\tau_\perp}{\varphi_a^2} + 0{,}5\right)},$$

определяемой числом каскадов m ФЭУ, полосой пропускания электронного тракта Δf, чувствительностью фотоприемника η_λ на длине волны λ, амплитудой качания φ_a; e — заряд электрона. Погрешность лучших автоматических поляриметров доведена до 0,002°. Они аттестуются по эталону единицы угла вращения. Отечественный эталон состоит из плоскопараллельной пластины кристаллического кварца и фотоэлектрического поляриметра и для зеленой линии ртути ($\lambda = 0{,}54607$ мкм) обеспечивает погрешность измерения 0,001°.

С помощью *спектрополяриметров* получают зависимость угла вращения плоскости поляризации от длины волны. При отсутствии полос поглощения в спектральной кривой $\Phi_v = f(\lambda)$ функция $\varphi = f(\lambda)$ нарастает с уменьшением λ. В полосах поглощения кривая вращательной дисперсии φ претерпевает резкие изменения. Амплитуда и знак этих изменений позволяют судить о составе вещества или его отклонениях от образцового.

В отличие от поляриметров спектрополяриметры имеют монохроматор со сменными решетками, обеспечивающими работу в спектральном диапазоне 0,2 ... 25 мкм. В приборах, используемых на практике, этот диапазон обычно равен 0,18 ... 0,7 мкм. Погрешность измерения современных спектрополяриметров составляет $\pm$(0,001 ... 0,01) °, а диапазон измеряемых углов 0,02 ... 90°.

В § 1.4 рассмотрено явление наведения оптической активности в веществе с помощью магнитного поля. Использование этого явления значительно расширяет круг объектов, качество которых можно оценить по углу вращения плоскости поляризации электромагнитной волны. Для растворов $\varphi_р = h_в c_р dH$, т. е. угол вращения однозначно связан с концентрацией $c_р$. Вне полосы поглощения раствора кривая дисперсии оптического вращения в магнитном поле H имеет плавный характер. В полосе поглощения наблюдается скачок $\varphi(\lambda)$, форма которого заметно отличается для парамагнитных и диамагнитных веществ.

Приборы, позволяющие получить зависимость $\varphi(\lambda)$, названы *магнитоспектрополяриметрами.* Они отличаются от спектрополяриметров наличием магнита, в поле которого помещается исследуемое вещество. Применение нашли постоянные магниты с напряженностью поля $(8 ... 12) \cdot 10^5$ А/м. Реже используются электромагниты, обычно в тех случаях, когда требуется получить сильные магнитные поля (напряженностью до $2{,}5 \times 10^6$ А/м).

Погрешность измерения отечественных магнитоспектрополяриметров доведена до десятитысячных долей градуса ($\pm$0,0004)°. Созданы приборы с рабочим диапазоном 0,22 ... 0,6; 0,437 ... 0,633; 10,6 мкм.

Эллипсометры — класс приборов, позволяющих определить изменение состояния поляризации при взаимодействии света с веществом. Они используются для контроля оптических и электрических параметров ОК (показателя преломления n, показателя поглощения $\varkappa$, диэлектрической проницаемости ε_a), при изучении процессов коррозии, оксидирования, полировки, для исследования смога, тумана, оценки размеров частиц коллоидных растворов и аэрозолей.

Принцип действия эллипсометров основан на сравнении состояния поляризации света, падающего на контролируемое ве-

щество и отраженного от него (или прошедшего через него). Эллиптически поляризованное излучение описывается углами ψ и φ:

$$\psi=\operatorname{arctg}(E_{x0}/E_{y0}),\quad \varphi=\varphi_x-\varphi_y,$$

связанными с относительными коэффициентами отражения (преломления):

$$\rho_{s1}=E_{rx}E_{iy}/(E_{ix}E_{ry})=\operatorname{tg}\psi_1\cdot e^{j\varphi_1},$$
$$\rho_{s2}=E_{dx}E_{iy}/(E_{ix}E_{dy})=\operatorname{tg}\psi_2\cdot e^{j\varphi_2}, \qquad (3.25)$$

где $k=i$, r, d — индексы падающей, отраженной и преломленной волн соответственно; E_{kx}, E_{ky} — комплексные амплитуды компонентов x, y падающей, отраженной и преломленной волн. Выражения (3.25) называют *основными уравнениями эллипсометрии.*

Практическая реализация метода эллипсометрии состоит в определении углов ψ и φ (с помощью эллипсометров), вычислении коэффициентов ρ_{s1}, ρ_{s2} и расчете искомых параметров контролируемого вещества (n, $\varkappa$, ε_a), функционально связанных с ρ_{s1}, ρ_{s2}. Зависимости параметров n, $\varkappa$, ε_a от ρ_{s1}, ρ_{s2} громоздки. Поэтому расчеты проводятся на ЭВМ.

Промышленностью выпускается несколько моделей приборов: эллипсометры ЛЭФ-2, Э-2, лазерные эллипсометрические микроскопы ЛЭМ-2М, ЛЭМ-3М1 и др. Погрешность измерения углов, обеспечиваемая ими, колеблется от $\pm0{,}05$ до $\pm0{,}005°$, время проведения одного опыта составляет единицы секунд.

Люминесцентные приборы предназначены для исследования строения вещества на длине волны люминесценции, которая не совпадает с длиной волны падающего излучения и определяется атомно-молекулярными свойствами ОК. В основу действия этих приборов положен принцип возбуждения флуоресценции в веществе с использованием лазера с перестраиваемой частотой; отклик анализируется обычным спектрометром. В последние годы созданы приборы для дистанционного возбуждения исследуемого вещества. Они получили название *лидаров* и представляют совокупность связанных между собой элементов: мощного лазера, оптического телескопа, спектрометра. Лидары используют для контроля загрязнения окружающего воздуха и качества воды естественных водоемов, поиска полезных ископаемых, предсказания землетрясений и т. д.

Флуоресцентные лидары оказались эффективными при решении задачи оперативного поиска месторождений урана с самолета. Иониты уранила UO_2^+, входящие в большинство урановых руд, характеризуются высоким квантовым выходом флуоресценции, достигающим 0,42 ... 0,8 при возбуждении на длине волны 0,425 мкм и детектировании на длине волны 0,525 мкм.

По данным экспериментов, содержание ионитов UO_2^+ может быть надежно зарегистрировано при высоте полета 280 м и их концентрации на поверхности Земли порядка 10^{-4}.

Эмиссионный анализ — метод исследования химического состава и строения вещества по спектру его излучения. В его основу положена зависимость между плотностью потока спектральных линий излучения компонентов вещества с их концентрацией в ОК. Современные приборы для эмиссионного анализа включают лазер, энергия которого выбирается достаточной для испарения контролируемого вещества. Участок с образующейся микроплазмой фокусируется во входную щель спектрометра, осуществляющего спектральный анализ испаряемых фракций. При надлежащей фокусировке излучения диаметр нагревающего пятна на ОК можно довести до 20 мкм. Абсолютная чувствительность таких приборов (минимальное количество химического элемента в пробе, которое обнаруживается по спектрограмме) достигает 10^{-9} г. Необходимость повреждения ОК — основной недостаток метода.

В настоящем параграфе изложены принцип действия, структурные схемы и достигнутые значения параметров основных типов оптических и оптико-электронных приборов, разработанных для контроля состава веществ. С их помощью удается решить широкий круг задач, возникающих при оценке качества выпускаемой продукции. Тем не менее на сегодняшний день существует потребность в приборах с более широкими функциональными возможностями, повышенным быстродействием и пригодными для контроля веществ сложного состава, особенно для контроля состояния окружающей среды и качества сельскохозяйственной продукции.

Контрольные вопросы

3.7.1. Какие схемы абсорбционных приборов используются на практике?

3.7.2. Объясните принцип построения анализаторов примесей в непрозрачных ОК.

3.7.3. В чем сущность метода нарушенного полного внутреннего отражения?

3.7.4. Какие принципы положены в основу работы спектрометров и спектрофотометров?

3.7.5. Укажите, чем отличаются структурные схемы спектрополяриметров и магнитоспектрополяриметров.

3.7.6. На чем основаны оптические методы измерения влажности веществ?

3.7.7. Приведите примеры применения эллипсометров.

3.7.8. Какие приборы можно использовать для определения загрязнения воздуха?

3.7.9. В чем достоинства и недостатки приборов эмиссионного анализа?

Глава 4

РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

4.1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Немецкий физик К. Рентген, проводя эксперименты с пучками электронов в сильно разреженной трубке (10^{-5} Па), обнаружил, что несмотря на то, что трубка была помещена в непроницаемом для видимого света картонном футляре, находившийся вблизи нее экран, покрытый двойной солью цианистого бария и платины, флюоресцировал всякий раз, когда через трубку проходил ток. Он пришел к заключению, что трубка испускает невидимые лучи, способные проникать сквозь непрозрачную для видимого света оболочку и вызывать свечение экрана. Было обнаружено, что лучи могут проходить через толстую книгу, лист алюминия толщиной 3 мм и тонкую свинцовую фольгу, и если поднести к экрану кисть руки, то можно отчетливо видеть контуры костей.

В своем докладе в конце 1895 г. К. Рентген сообщил о главнейших свойствах открытого им излучения. Через несколько месяцев после этого сообщения был опубликован снимок сварного шва, полученный с помощью рентгеновского излучения. В 1908 г. было установлено, что в состав рентгеновского излучения входит характеристическое излучение.

В 1912 г. М. Лауэ по открытым им явлениям дифракции и интерференции рентгеновского излучения при его взаимодействии с кристаллом экспериментально установил, что это излучение не отличается по своей природе от видимого излучения. Естественная радиоактивность была открыта А. Беккерелем в 1896 г., а в 1898 г. супруги Кюри получили из руды смоляной обманки хлористый радий. Естественные радиоактивные вещества эмиттируют в основном три типа излучения: альфа-, бета- и гамма-. Позднее было установлено, что гамма-излучение представляет электромагнитное излучение той же физической природы, что и рентгеновское. Искусственные радиоактивные изотопы (радиоизотопы) были получены при использовании циклотронов (1930), а с появлением ядерных реакторов идентифицировано и изучено большое число радиоизотопов. Ядра радиоизотопов распадаются с выделением альфа-, бета- и гамма-излучения, однако не каждый изотоп дает все три типа излучения.

Как известно, открытие и первые экспериментальные исследования ядерных реакций относятся к 1919 г. Э. Резерфорд и его сотрудники пользовались в этих работах излучением естественных радиоактивных элементов с энергией около 7,7 МэВ. Возникшая в 20-е годы идея о том, что в этих исследованиях частицы естественных элементов следует заменить искусственно полученными быстрыми частицами, кажется теперь настолько простой и очевидной, что автор ее никогда не упоминается. Л. В. Мысовский, возглавлявший физический отдел Государственного радиевого института при Российской Академии, был одним из первых физиков, поставивших задачу создать ускоритель заряженных частиц, сравнимых по энергии с естественными частицами (1922 г.). Первый электростатический ускоритель (на напряжение 80 кВ) был построен в 1929 г. Ван де Граафом. Первый ядерный реактор был запущен в США в 1942 г., в СССР — в 1946 г.

Следует отметить, что при создании таких перспективных для НК ускорителей, как бетатрон и волноводный линейный ускоритель электронов, от зарождения идеи до ее реализации потребовался достаточно большой срок — первый бетатрон был запущен в 1940 г. (Д. Керст, США), первый линейный ускоритель электронов — в 1946 г. Бетатрон был бы создан намного раньше, если бы была разработана достаточно полная теория его функционирования, объединяющая полученные ранее результаты. Волноводный ускоритель не мог быть построен до появления мощных генераторов сантиметровых волн. В СССР первый бетатрон был создан в Томском политехническом институте под руководством А. А. Воробьева.

Микротрон — циклический резонансный ускоритель электронов — был предложен в 1944 г. советским физиком В. В. Векслером на основе открытого им принципа автофазировки.

Отечественная рентгеновская промышленность была создана во второй половине 20-х годов. Пионерами в области разработки и производства рентгеновских аппаратов были В. В. Витка и А. И. Тхоржевский, а в области разработки рентгеновских трубок — Ф. Н. Хараджа. Большую роль в отечественном рентгеноаппаратостроении сыграла деятельность В. К. Шмелева и В. А. Цукермана. Работы В. А. Цукермана и его сотрудников являются основополагающими в области импульсного рентгеноаппаратостроения.

Основы метода радиационного контроля были разработаны в конце 30-х годов, что нашло свое отражение в книге А. К. Трапезникова «Просвечивание материалов лучами Рентгена» (1939). До 1947 г. существующие источники излучения позволяли просвечивать объекты контроля из стали толщиной до 50 мм.

История нейтронной радиографии восходит к открытию нейтрона в начале 30-х годов. Первые работы по нейтронной радио-

графии были выполнены в 1930—1940 гг., специалисты СССР начали активно работать в этой области в 70-х годах. Использовать полупроводники для воспроизведения изображений впервые предложил русский изобретатель Е. Е. Горин в 1916 г. Первый электрорентгенографический снимок был получен в 1938 г., в мире работы по электрорентгенографии стали проводить с 1950—1951 гг., а в СССР — с 1959 г.

С конца 30-х годов, когда в промышленности стало использоваться рентгеновское оборудование, и вплоть до недавнего времени рентгеновская техника почти не прогрессировала. Даже в начале 50-х годов рентгеновское оборудование, использовавшееся в промышленности, представляло главным образом несколько измененные рентгеновские установки медицинского назначения, причем наиболее существенные изменения были направлены на повышение лучевой отдачи излучателей, уменьшение размеров фокусного пятна и удобство эксплуатации. Преобразование рентгеновского излучения в форму, удобную для визуального наблюдения, производилось либо с помощью флуоресцирующих экранов (рентгеноскопия), либо с помощью фотоэмульсии (рентгенография).

Рентгеновская техника начала интенсивно развиваться с середины 60-х годов, когда серийно стали выпускаться рентгеновские трубки с анодным напряжением 200 и 250 кВ и током до 8 мА. Увеличение тока с 5 до 8 мА существенно облегчило получение рентгенограмм и привело к значительному уменьшению времени экспозиции. В последние годы ряд зарубежных фирм начал серийное производство микрофокусного рентгеновского оборудования (диаметр фокусного пятна менее 0,1 мм) и аппаратуры, укомплектованной высокочастотными высоковольтными генераторами с постоянным (сглаженным) напряжением.

С 50-х до середины 60-х годов бурно расширялась сфера применения электронно-оптических преобразователей (ЭОП), изобретенных Холстом и де Буром в 1934 г. Были выявлены преимущества ЭОП при усилении яркости изображения и при использовании их в рентгеновской технике. С этого момента стал интенсивно развиваться один из основных методов НК — метод радиационной интроскопии (радиоскопии).

Одним из первых радиационных электронно-оптических преобразователей (РЭОП) стал усилитель радиационного изображения «Флюоренс» с рентгеновским флюоресцентным экраном, размещенным внутри вакуумной колбы ЭОП, и электронно-оптическим уменьшением масштаба изображения, описанный Кольтменом в 1948 г. Рентгенофлюоресцентное вещество было нанесено на одну сторону тонкой стеклянной подложки, а фотокатод — на другую.

Конструкция и технология изготовления первых отечествен-

ных РЭОП с уменьшением масштаба изображения были разработаны М. М. Бутсловым с сотрудниками.

Возрастающие требования к качеству изображения контролируемых объектов привели в начале 80-х годов к необходимости цифровых методов их обработки. Таким образом, комбинация источников проникающего излучения, радиационно-оптических преобразователей, телевизионных и цифровых систем позволила получить высококачественные изображения непрозрачных объектов в реальном времени и производить их автоматическую обработку. Термин «реальное время» означает, что определенные задачи могут быть решены за время длительности одного или нескольких телевизионных кадров.

Развитие радиационного контроля как нового современного метода НК неразрывно связано с именем проф. С. В. Румянцева и его школой. В монографии С. В. Румянцева «Радиационная дефектоскопия» (1968) наряду с детальным описанием и обсуждением различных методов и средств радиационного контроля рассмотрены вопросы защиты от ионизирующих излучений и влияния дефектов на механические свойства изделий.

Важный вклад в развитие отечественного радиационного контроля внесла томская школа физиков, основанная проф. А. А. Воробьевым. Ее представители: проф. В. И. Горбунов, занимающийся вопросами контроля с использованием источников высоких энергий, радиационной интроскопии, проф. В. А. Кононов — вопросами контроля с использованием электронного и протонного излучения, проф. В. А. Воробьев — вопросами радиационной гранулометрии, гамма-плотнометрии.

Крупный вклад в становление и развитие радиационного контроля внесли коллективы, возглавляемые чл.-кор. АН СССР В. В. Клюевым (радиационная интроскопия, радиационная вычислительная томография) и проф. А. С. Штанем (радиационные источники излучения, радиометрия, нейтронная радиография), коллектив Вильнюсского научно-исследовательского института электронографии (И. И. Жилевич, А. И. Каминскас, Р. Ю. Каваляускас, В. Г. Чапенко) и др.

§ 4.2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НК

В радиационном контроле используют в основном *три вида ионизирующих излучений: рентгеновское, гамма-* и *нейтронное*. Источниками рентгеновского излучения в промышленности служат ускорители электронов (рентгеновские аппараты, микротроны, бетатроны, линейные ускорители и т. п.) и источники бета-излучения. Для получения гамма-излучения используют в основном радиоактивные источники. Источниками нейтронов яв-

ляются ядерные реакторы, радионуклидные источники и ускорители заряженных частиц (генераторы).

Ускорители электронов различаются по конструкции, назначению, максимальной энергии электронов и другим характеристикам. Они классифицируются по форме траектории частиц в ускорителе и по принципу ускорения (табл. 4.1). *По форме траектории электронов* различают линейные ускорители, траектория частиц в которых близка прямой, и циклические, в которых электроны под действием ведущего магнитного поля движутся по орбитам, близким к круговым.

Таблица 4.1

Классификация современных ускорителей электронов

По форме траектории электронов	По принципу ускорения		
	высоковольтный	индукционный	резонансный
Линейный ускоритель	Рентгеновский аппарат, электростатический каскадный, импульсный ускоритель	Линейный индукционный	Линейный резонансный
Циклический ускоритель:			
ведущее магнитное поле постоянное			Микротрон, электронный накопитель
ведущее магнитное поле изменяется во времени		Бетатрон	

По принципу ускорения, т. е. по характеру ускоряющего электрического поля, ускорители делят на высоковольтные, индукционные и резонансные. *В высоковольтных* ускорителях ускоряющее электрическое поле обусловлено большой разностью потенциалов между электродами ускоряющего промежутка и действует в течение интервала времени, значительно большего времени пролета электронами всего пути ускорения. В таких ускорителях траектория электронов преимущественно прямолинейная. В ускорителях *индукционного типа* ускорение электронов осуществляется с помощью вихревого электрического поля. В *резонансных* ускорителях движение электронов происходит синхронно с переменным ускоряющим полем. Частота ускоряющего поля может быть постоянной или монотонно изменяться. Индукционные и резонансные ускорители могут быть линейными и циклическими.

4.2.1. Рентгеновские аппараты

Рентгеновским аппаратом называют совокупность технических средств, предназначенных для получения и использования рентгеновского излучения. Основные блоки рентгеновского аппарата: *рентгеновский излучатель, рентгеновское питающее устройство, устройства для применения рентгеновских лучей* и дополнительные устройства и принадлежности.

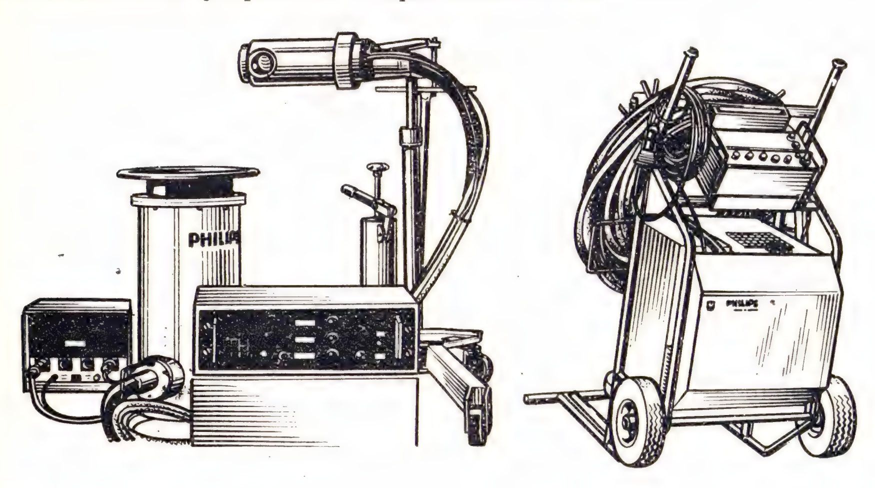


Рис. 4.1. Внешний вид стационарного кабельного с направленным выходом излучения рентгеновского аппарата MG 225 (фирмы Philips, ФРГ):

напряжение на трубке 225 кВ; ток рентгеновской трубки 15 мА; мощность потребления 4,5 кВт (предельные параметры)

Рис. 4.2. Внешний вид передвижного кабельного с направленным выходом излучения рентгеновского аппарата MG 225L (фирма Philips, ФРГ):

напряжение на рентгеновской трубке 225 кВ, ток трубки 10 мА (предельные параметры)

Рентгеновский излучатель — это рентгеновская трубка, заключенная в защитный кожух. Рентгеновская трубка является высоковольтным электровакуумным прибором. В состав рентгеновского питающего устройства входят электрические устройства, служащие для питания трубки электрической энергией, а также высоковольтный генератор и пульт управления. Устройства для применения рентгеновских лучей предназначены для приведения в рабочее положение (или движение) излучателя, ОК и приемника излучения.

Рентгеновские аппараты классифицируют:

по конструктивному исполнению — моноблочные и кабельные;

по способу применения — стационарные (рис. 4.1), передвижные (рис. 4.2) и переносные;

по углу выхода рабочего пучка излучения — с направленным выходом и панорамным.

Основные параметры рентгеновских аппаратов:

номинальное напряжение (максимальное значение), создаваемое аппаратом на рентгеновской трубке;

ток рентгеновской трубки (среднее значение) при номинальном напряжении;

диапазон регулирования напряжения на трубке;

размер эффективного фокусного пятна трубки;

мощность экспозиционной дозы;

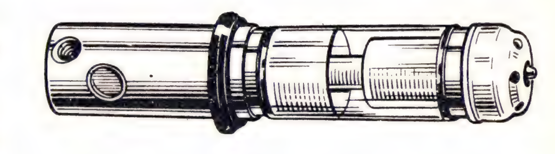


Рис. 4.3. Внешний вид рентгеновской трубки 1БПВ15-100

диапазон времени экспозиции;

продолжительность работы аппарата в номинальном режиме;

мощность потребления;

масса рентгеновского излучателя (моноблока);

габаритные размеры рентгеновского излучателя (моноблока).

Рентгеновская трубка (рис. 4.3) — это электронный вакуумный прибор — баллон с запаянными в него электродами: катодом и анодом (рис. 4.4). Рентгеновские лучи возникают в ре-

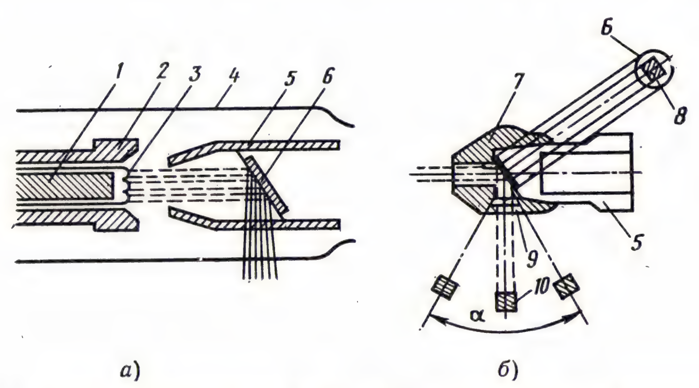


Рис. 4.4. Схема рентгеновской трубки (*а*) и проекций ее излучающей области (*б*):

1 — катодный узел; *2* — фокусирующий электрод; *3* — нить накала; *4* — баллон из металла или стекла; *5* — анодный узел; *6* — мишень; *7* — медный чехол; *8* — излучающая область трубки; *9* — рентгенопрозрачный диск; *10* — эффективное фокусное пятно

зультате резкого торможения быстродвижущихся электронов на аноде трубки. Баллон может быть выполнен из стекла или металла. Баллон из металла вакуумно-плотно припаивается к керамическому (Al_2O_3) изолятору.

Давление остаточного газа внутри баллона составляет около 10^{-4} Па. Число эмиттируемых электронов зависит от температу-

ры или от электрического тока через вольфрамовую проволоку, из которой изготовлена нить, расположенная внутри катодного узла. Повышение температуры нити накала уменьшает срок ее службы. При увеличении ускоряющего напряжения растет кинетическая энергия электронов, что приводит к повышению проникающей способности рентгеновского излучения.

Плотность потока энергии рентгеновского излучения прямо пропорциональна току эмиссии катода. Эмиссия электронов из нити накала, как и при всех других видах электронной эмиссии, является случайным процессом, так что выход одного электрона почти не зависит от выхода другого. Часть кинетической энергии электронов в рентгеновских трубках, превращающихся в энергию рентгеновских фотонов, относительно низка и определяется выражением $\eta \approx 10^{-9} ZU$, где Z — атомный номер элемента, составляющего материал анода; U — ускоряющее напряжение, В. Так, из 90 электронов с энергией $E=150$ кэВ, провзаимодействовавших с вольфрамовой мишенью анода, в среднем только один стимулирует выход одного кванта рентгеновского излучения с энергией 100 кэВ, поэтому почти вся кинетическая энергия электронов превращается на мишени в тепловую. Вследствие высоких температурных нагрузок мишень анода необходимо изготовлять из материала с очень высокой температурой плавления, чаще всего из вольфрама ($Z=74$). Мишень устанавливается только в том месте на поверхности медного стержня анодного узла, куда попадают электроны, с целью максимального рассеяния теплоты, поскольку удельная теплопроводность меди намного больше удельной теплопроводности вольфрама. Площадь поперечного сечения электронного пучка, падающего на мишень, должна быть достаточно большой для того, чтобы ограничить удельную тепловую нагрузку q на поверхность вольфрамовой мишени. Предельное значение нагрузки (Вт/мм^2), приведенной к единице *площади эффективного фокусного пятна* промышленного излучателя,

$$q \approx 10^3/f, \tag{4.1}$$

где f — размер фокусного пятна, мм. *Эффективным фокусным пятном источника* ионизирующего излучения (*фокусным пятном*) называют проекцию излучающей области источника на плоскость, перпендикулярную оси рабочего пучка излучения.

Эмиттируемый катодом пучок электронов фокусируется на определенный участок мишени в результате выбора соответствующей формы электродов катода или при помощи средств электронной оптики. Форма сечения электронного пучка зависит от конфигурации нити накала катода. Нити накала в виде плоской спирали соответствует круглое сечение, тогда как цилиндрическая нить формирует пучок прямоугольной формы. Соответствующий выбор угла наклона рабочей поверхности ано-

да позволяет уменьшить проекцию поверхности активной области на плоскость, перпендикулярную оси рабочего пучка излучения. Для современных рентгеновских трубок, предназначенных для дефектоскопии, максимальная энергетическая нагрузка, приведенная к единице площади фокусного пятна, может достигать значений, определяемых соотношением (4.1). По размеру фокусного пятна различают рентгеновские трубки: стандартные ($f>0{,}4$ мм), мини-фокусные ($f=0{,}1 \ldots 0{,}4$ мм), микрофокусные ($f<0{,}1$ мм). Типичный размер фокусного пятна микрофокусной рентгеновской трубки около 10 мкм.

Рентгеновская трубка генерирует излучение, энергетический спектр которого простирается от нуля до некоторого значения энергии $E=eU$, где U — номинальное напряжение (максимальное значение) на рентгеновской трубке. В диапазоне значений $E=20 \ldots 500$ кэВ этот спектр непрерывен и его максимум находится в диапазоне 0,5 ... 0,66 максимального значения энергии фотонов в спектре. Обычно в спектре имеется некоторое число полос, характерных для материала мишени анода. Рабочее напряжение между анодом и катодом у однополюсных трубок (анод заземлен) может достигать 225 кВ, у двухполюсных (как к катоду, так и к аноду приложено высокое напряжение) — 450 кВ. Мощность современных рентгеновских трубок, используемых для неразрушающего контроля, достигает 4,5 кВт.

Рентгеновские аппараты можно также классифицировать по *схемам выпрямления напряжения* (схема питания главной цепи), при этом анодное напряжение на трубке может быть переменным, пульсирующим или постоянным.

Для моноблочных маломощных рентгеновских аппаратов используют полуволновую безвентильную схему самовыпрямления (рис. 4.5, *а*). Преимущество такой схемы — простота, небольшие габариты и масса; недостаток — низкий анодный ток из-за возможности появления вторичной электронной эмиссии (обратный ток) при перегреве зеркала анода. В питающих устройствах широко используется *мостовая схема двухполупериодного выпрямления* (рис. 4.5, *б*). В один полупериод ток проходит через *VD1* и *VD3*, а в другой — через *VD2* и *VD4*. Ранее широко использовались *схема удваивания с пульсирующим напряжением* (рис. 4.5, *в*) и *схема удваивания с постоянным* (сглаженным) *напряжением* (рис. 4.5, *г*). В настоящее время в питающих устройствах для уменьшения пульсаций при сглаживании напряжения используют схемы на промежуточных частотах 500 Гц и более.

При использовании рентгеновского аппарата с постоянным напряжением на трубке 100 ... 500 кВ экспозиционная доза за объектом контроля, действующая на детектор, пропорциональна U^n, где U — напряжение на рентгеновской трубке, $n=7 \ldots 11$. Таким образом, повышение напряжения на рентгеновской труб-

ке приводит к резкому повышению плотности потока фотонов (энергии) за ОК. Это приводит к тому, что время просвечивания ОК аппаратом полуволнового типа в 2,2 раза больше, чем для аппарата с постоянным напряжением той же мощности. Если потребовать равенства экспозиционных доз за ОК, то на переменном напряжении на трубке необходима электрическая мощность, в 2,25 раза большая, чем на постоянном.

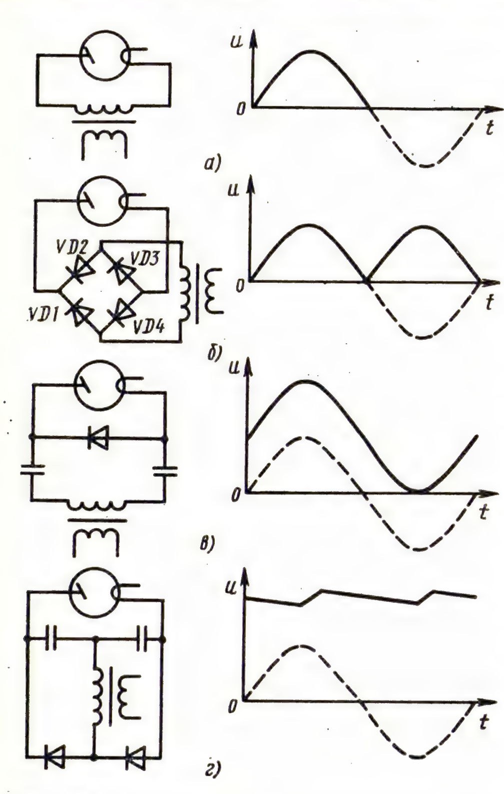


Рис. 4.5. Схема питания рентгеновских трубок:

а — полуволновая безвентильная; *б* — двухполупериодного выпрямления; *в* — удваивания с пульсирующим напряжением; *г* — удваивания со сглаженным напряжением

При использовании источников совместно с цифровыми системами формирования и обработки изображений большое внимание уделяется стабилизации постоянного рабочего напряжения (пульсации не более 0,05%). В рентгеновских установках с пульсирующим напряжением вольфрамовая мишень, помещенная в медь анода, подвергается сильным переменным термическим нагрузкам вследствие пульсаций энергии электронного пучка, взаимодействующего с мишенью. По этой причине удельные тепловые нагрузки, приведенные к единице площади фокусного пятна, у таких установок примерно в 3 раза меньше предельной нагрузки, определяемой соотношением (4.1). Кроме того, в этом случае из-за опасности испарения вольфрама максимальную температуру фокусного пятна приходится ограничивать меньшими значениями, чем в рентгеновских установках постоянного напряжения.

Анодный ток трубок различного типа изменяется от нескольких микроампер (микрофокусные трубки) до десятых долей ампера, а размер фокусного пятна — от 1 мкм до нескольких миллиметров. Широко применяют двухфокусные рентгеновские трубки (например, при $U = 160$ кВ анодный ток равен 4 мА при

фокусном пятне 0,4×0,4 мм и 19 мА при фокусном пятне 3,0×3,0 мм). Угловые размеры пучка рентгеновского излучения у аппаратов с направленным выходом излучения (см. рис. 4.2) могут достигать 40°. У аппаратов с панорамным выходом излу-

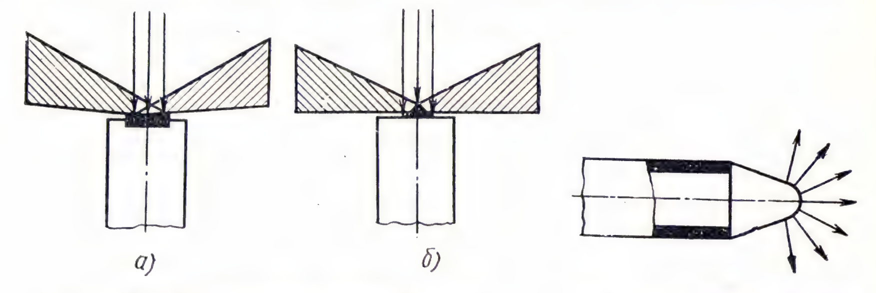


Рис. 4.6. Конфигурация мишеней анода: *а* — плоская; *б* — коническая

Рис. 4.7. Схема торцевого излучателя

чения мишень анода может иметь плоскую или коническую форму (рис. 4.6). Если анод выполнен в виде тонкой стенки, то используется торцевое излучение (рис. 4.7). Для повышения плотности потока энергии излучения внутренняя поверхность анода в такой конструкции покрывается тонким слоем золота ($Z=79$).

В практических приложениях обычно принимают, что рентгеновское излучение, возникающее при торможении электронного пучка мишенью, изотропно. Однако так можно считать при довольно низких энергиях электронов в пучке, например для фотонов, излучаемых электронами с кинетической энергией не выше 100...200 кэВ. Если же энергия электронов, заторможенных мишенью, больше, всегда происходит увеличение доли плотности потока энергии фотонов, излучаемых в направлении электронного пучка. Из рис. 4.8 видно, что при использовании электронов с кинетической энергией 2 МэВ плотность потока энергии фотонов в направлении электронного пучка более чем 5 раз превышает плотность потока энергии в обратном направлении.

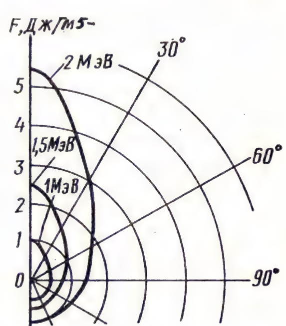


Рис. 4.8. Угловое распределение плотности потока энергии фотонного излучения

Так как торможение электронов, а следовательно, и генерирование рентгеновского излучения происходят главным образом в приповерхностном слое мишени, при выходе из этого слоя излучение частично ослабляется материалом мишени. Ослабление потока фотонов, идущих в разных направлениях, неодинаково.

Наиболее сильно ослабляются пучки, выходящие из мишени под малыми углами к ее поверхности. При этом из-за значительного поглощения излучения материалом мишени его фотоны в среднем имеют бо́льшую энергию, чем фотоны, выходящие из мишени под бо́льшими углами к ее поверхности. Рис. 4.9 иллюстрирует относительные угловые распределения плотности потока энергии фотонов, генерируемых рентгеновской трубкой, схема которой представлена на рис. 4.4, как при отсутствии ослабляющей рентгеновское излучение среды (фильтр), так и при фильтрации излучения стальными пластинами различной толщины. При построении кривых предполагалось, что пучок электронов в трубке направлен справа налево, а углы отсчитываются от направления электронов в пучке.

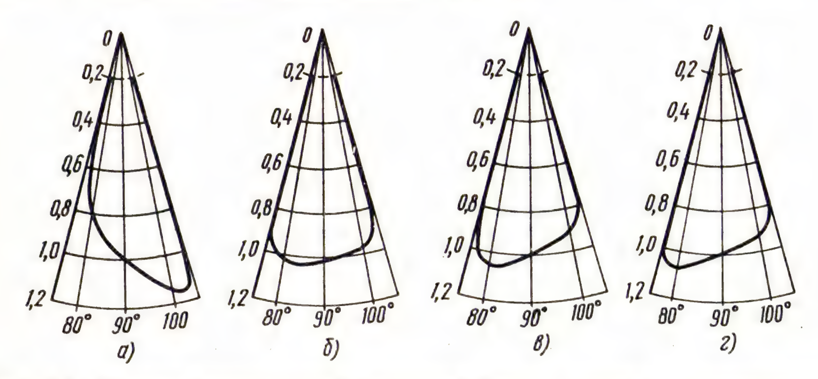


Рис. 4.9. Угловое распределение плотности потока энергии в рентгеновском пучке при напряжении на рентгеновской трубке 150 ... 400 кВ:

а — фильтрация излучения отсутствует; *б* — фильтр (пластина толщиной 10 мм, Fe); *в* — фильтр (20 мм, Fe); *г* — фильтр (30 мм, Fe)

4.2.2. Микротроны [28, 29]

Микротрон является циклическим ускорителем параллельного действия (электрическое поле одной ячейки многократно ускоряет электроны), поэтому мощность генераторов СВЧ для питания микротрона может быть гораздо меньше, чем это необходимо для питания линейных ускорителей, где электроны проходят ячейки однократно, а сам микротрон имеет более простую конструкцию, меньшие габариты и массу, чем линейный ускоритель, и близкую последнему плотность потока энергии тормозного излучения.

По сравнению с бетатроном обычной конструкции плотность потока энергии тормозного излучения микротрона на один-два порядка выше. Кроме того, у сильноточных бетатронов сложнее конструкция, больше габариты и масса. В силу указанных причин, а также благодаря малым поперечным размерам электрон-

ного пучка микротрона, его моноэнергетичности (примерно одинаковые энергии электронов в пучке) и стабильности эти ускорители и нашли применение в дефектоскопии.

Типичные характеристики микротронов, используемых для дефектоскопии

Энергия электронов пучка, МэВ	5 ... 12
Средний ток пучка, мкА	20 ... 200
Размер фокусного пятна, мм	1,5 ... 3
Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от мишени, Р/мин	500 ... 700
Габариты блока излучателя, м	1×1,5×1,5
Масса, т	1 ... 1,5

4.2.3. Бетатроны [28]

Принцип действия бетатрона заключается в следующем. Электроны, инжектируемые в вакуумную камеру, ускоряются под действием вихревого электрического поля, образуемого переменным магнитным потоком, который, в свою очередь, создается с помощью специальной системы электромагнитов. В течение всего цикла ускорения электроны движутся по круговой орбите постоянного радиуса, плоскость которой перпендикулярна оси симметрии магнитного поля. Для сохранения постоянства радиуса орбиты необходимо, чтобы скорость нарастания энергии электрона равнялась скорости нарастания напряженности магнитного поля. Это условие достигается тем, что отношение магнитного потока Φ_0, заключенного в круге равновесной (идеальной) орбиты, к площади этого круга радиусом r_0 равно удвоенной индукции B_0 магнитного поля на самой орбите, т. е. $\Phi_0/(2\pi r_0)=2B_0$.

В современных бетатронах напряженность электрического поля на орбите достигает 0,2 ... 0,25 В/см. Для достижения конечной энергии электронов в несколько миллионов электрон-вольт в процессе ускорения они должны совершить по равновесной орбите более миллиона оборотов. Чтобы обеспечить устойчивое движение электронного пучка в течение всего цикла ускорения, напряженность магнитного поля в зазоре системы электромагнитов в плоскости орбиты убывает с расстоянием от центра орбиты к периферии. Такое пространственное распределение магнитного поля в области равновесной орбиты вызывает появление фокусирующих сил при отклонении электронов от равновесной орбиты (например, вследствие соударения электронов с молекулами воздуха), которые заставляют электроны возвращаться на равновесную орбиту. По окончании цикла ускорения электроны с помощью специальных устройств смещаются с равновесной орбиты и попадают на мишень, где генерируется тормозное излучение.

Бетатроны промышленного назначения рассчитываются в основном на диапазон энергий 15 ... 31 МэВ, хотя некоторые из них, созданные, например, в СССР, спроектированы на энергию 2... 6 МэВ.

Основные технические характеристики бетатрона на максимальную энергию 24 МэВ

Масса блока излучателя, кг	3700
Размер фокусного пятна, мм	0,2×0,2
Мощность дозы излучения на расстоянии 1 м от мишени, Р/мин	180

4.2.4. Линейные ускорители

Из известных типов линейных ускорителей электронов в практике радиационного контроля широкое применение нашли резонансные линейные ускорители с энергией от единиц до десятков мегаэлектрон-вольт [28].

Принцип действия линейного резонансного ускорителя заключается в следующем. Электроны, предварительно ускоренные в инжекторе (например, в электронной пушке), вводятся в ускоряющую систему — цилиндрический диафрагмированный волновод (рис. 4.10), в котором возбуждается бегущая электромагнитная волна типа E_{01} с фазовой скоростью $v_ф$ (линейный ускоритель с бегущей волной). Электроны, попавшие в ускоряющую полуволну, ускоряются вдоль оси волновода под действием продольной составляющей электрического поля. При этом энергия электронов непрерывно увеличивается, если фазовая скорость волны равна скорости электронов $v_э$ в процессе всего цикла ускорения.

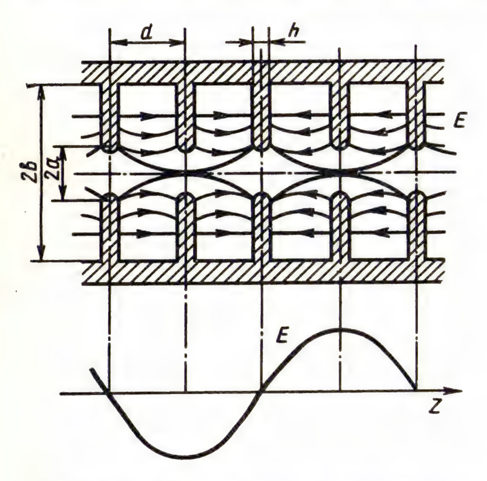


Рис. 4.10. Силовые линии электрического поля в диафрагменном волноводе

Фазовая скорость электромагнитных колебаний, распространяющихся в волноводе, зависит от типа, длины волны и конструкции волновода. В гладком цилиндрическом волноводе она больше скорости света, и ускорение невозможно. В линейных ускорителях обычно применяют металлический гладкий цилиндрический волновод, в котором для замедления скорости электромагнитной волны устанавливают системы круглых проводящих

диафрагм. Ячейки диафрагмированного волновода можно рассматривать как совокупность связанных через центральные отверстия объемных резонаторов.

Назначением первой части волновода, иногда называемой группирующей секцией, является индуцирование электронов и группировка их в импульсы короткой длительности. В этой секции электроны, вводимые в волновод на ранней стадии процесса ускорения, замедляются, а на поздней — несколько ускоряются относительно несущей волны. Вторая часть волновода называется ускоряющей секцией. Для питания волновода используют мощные генераторы колебаний СВЧ — импульсные магнетроны и клистроны, работающие в диапазоне длины волн 10... 25 см. Волны длиной 3 см используют лишь в некоторых установках. Плотность потока энергии излучения линейных ускорителей во много раз выше, чем бетатронов с той же энергией электронов. Так, мощность дозы тормозного излучения линейных ускорителей с энергией электронов 12 МэВ и размером фокусного пятна 1 мм составляет 6000 Р/мин на расстоянии 1 м от мишени, а у бетатрона с той же энергией электронов — только 80 Р/мин.

4.2.5. Электронные накопители

В настоящее время многие циклические ускорители электронов используются для работы в качестве источников *синхротронного излучения* (СИ), возникающего при движении высокоэнергетичных электронов в магнитном поле. Чаще всего для этих целей используют накопительные кольца (накопители), в которых пучок высокоэнергетичных электронов может циркулировать часами. В накопитель (рис. 4.11) инжектируются уже ускоренные электроны, энергия которых равна или немного меньше рабочей энергии в кольце. В накопителях установлены фокусирующие и поворотные магниты. Фокусирующие мультипольные магниты формируют неоднородное поле, которое воздействует на электроны как линза, стягивающая их в узкий пучок по оси камеры. Поворотные магниты своим полем, перпендикулярным направлению движения электронов, искривляют их траекторию так, что она включает несколько дуг окружности, соединенных прямолинейными участками. Синхротронное излучение, рождающееся на криволинейных участках траектории, выводится из камеры по тангенциально расположенным каналам. Электроны проходят через один или несколько резонаторов, в которых создается ускоряющее с частотой порядка 100 МГц электромагнитное поле, восполняющее потери энергии пучка на СИ. После прохождения резонатора пучок электронов выходит в виде электронных сгустков протяженностью в несколько сантиметров.

Важной характеристикой источника СИ является плотность потока энергии, испускаемого в единичный телесный угол с единицы площади активной зоны источника. СИ характеризуется чрезвычайно высокой плотностью потока энергии, иногда называемой яркостью источника. СИ от поворотных магнитов при-

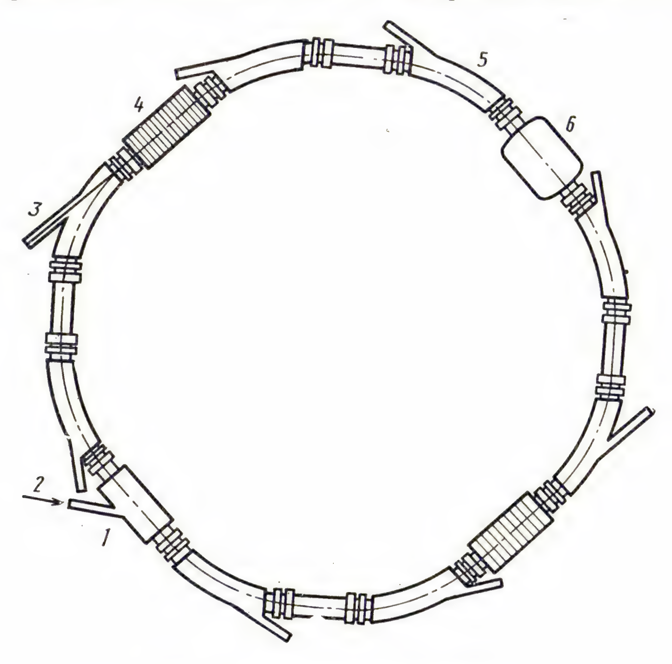


Рис. 4.11. Накопительное кольцо:

1 — магнитный инжектор; *2* — электроны из инжектора; *3* — выход СИ; *4* — ондулятор; *5* — поворотный магнит; *6* — радиочастотный резонатор; 7 — вигглер

мерно в 10^6 раз ярче, чем излучение рентгеновских источников. Плотность потока энергии СИ можно увеличить, если заставить электроны колебаться при их движении в накопительном кольце. Для этого предназначены вигглеры и ондуляторы (от франц. onde — волна) — магнитные устройства, которые устанавливаются на прямолинейных участках между поворотными магнитными кольцами. Конструктивно они выполнены в виде набора магнитных диполей, которые создают чередующиеся по знаку (знакопеременные) магнитные поля, направленные перпендикулярно электронному пучку. Это позволяет электронному пучку двигаться по синусоиде и излучать СИ в направлении движения электронов.

Вигглеры и ондуляторы дают различное угловое отклонение пучка. В вигглере этот угол велик по сравнению с естественной расходимостью СИ, поэтому имеет место непрерывный спектр

СИ на его выходе. Мощность и яркость СИ на выходе вигглера больше по сравнению с СИ от поворотных магнитов. Отношение значений этого параметра для вигглера и поворотного магнита равно числу магнитных диполей. В ондуляторе угловое отклонение электронного пучка, вызываемое одним диполем, меньше или близко естественной расходимости СИ, поэтому СИ от каждого электрона может усиливать друг друга или подавлять излучение в сгустке. При таком стимулированном излучении вся энергия СИ концентрируется на частотах, где происходит усиление. Для пучка электронов очень малого сечения отношение яркости излучения от ондулятора и от поворотного магнита равно квадрату числа полных осцилляций электронного пучка.

Синхротронное излучение перспективно использовать для таких методов контроля, как контактная микроскопия, рентгеновская томография, проекционная микроскопия, сканирующая микроскопия, голографическая микроскопия, рентгеноструктурный анализ, определение элементного состава ОК, а также для метрологии и медицинских приложений.

Технические характеристики электронных накопителей

Энергия электронного пучка, ТэВ	0,1 ... 20
Ток пучка, А	0,1 ... 1
Диаметр накопительного кольца, м	2 ... 400
Время жизни пучка в накопителе, ч	1 ... 1000

4.2.6. Радионуклидные источники излучения

Это источники излучения, содержащие радиоактивный материал, т. е. материал (вещество), в состав которого входит радионуклид или радионуклиды. *Радионуклид* — это совокупность атомов с определенным числом протонов и нейтронов в ядре, обладающих радиоактивностью. При радиационном контроле используются исключительно искусственные радионуклиды, получаемые: облучением неактивных заготовок в нейтронных потоках ядерных реакторов (например ^{60}Co, ^{192}Ir); разделением остаточных продуктов деления горючего ядерного реактора (^{137}Cs, ^{90}Sr); облучением неактивных заготовок — мишеней на циклотронах (^{55}Fe, ^{54}Mn).

Закрытый радионуклидный источник излучения представляет определенное количество радиоактивного нуклида или его соединения, помещенного в специальную герметичную капсулу (капсулы), препятствующую взаимным контактам радиоактивного материала с окружающей источник средой. Способ герметизации, материал и число капсул зависят от характеристик излучения, физического состояния (твердое вещество, порошок, жидкость) и свойств нуклидов. Радионуклиды являются активной частью источника излучения.

Рассмотрим *характеристики радионуклидных источников излучения. Закон радиоактивного распада* описывает распад ядер радионуклидов во времени: $N = N_0 \exp(-\lambda t)$, где N — число нераспавшихся ядер спустя время t; N_0 — исходное число ядер радионуклида; λ — постоянная, характеризующая скорость радиоактивного распада. *Период полураспада* $T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda = 0{,}693/\lambda$ — время, в течение которого распадается половина ядер данного радионуклида.

Активность радионуклида — это отношение числа $\mathrm{d}N$ спонтанных ядерных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида в источнике, происходящих за интервал времени $\mathrm{d}t$, к этому интервалу: $A = \mathrm{d}N/\mathrm{d}t$. В СИ активность радионуклида измеряется в беккерелях (Бк); 1 Бк — это активность нуклида в радионуклидном источнике, в котором за 1 с происходит один акт распада. Наряду с беккерелями широко используемой единицей активности радионуклида является кюри: 1 Ки $= 3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Удельная активность радионуклида — это отношение активности радионуклида в радиоактивном образце к массе образца. *Объемной активностью радионуклида* называют отношение активности радионуклида в радиоактивном образце к объему образца.

В зависимости от вида испускаемого источником ионизирующего излучения различают *радионуклидные источники гамма-излучения, рентгеновского излучения* и *быстрых нейтронов.*

Важными для радиационного контроля характеристиками радионуклидных источников излучения являются:

энергия E (энергетический спектр) излучения, которая определяет его проникающую способность и выявляемость дефектов в объектах контроля различной толщины, плотности и химического состава;

мощность экспозиционной дозы (*МЭД*) P_0 *излучения* на расстоянии 1 м от источника, определяющая производительность контроля, требования к технике безопасности и защитным устройствам;

удельная активность радионуклида в источнике, определяющая размеры активной части источника и, следовательно, качество изображений дефектов;

период полураспада $T_{1/2}$, который определяет периодичность замены источников и затраты на их эксплуатацию;

размеры источников, определяющие технологичность контроля.

Радионуклидные источники гамма-излучения представляют капсулы, заполненные гамма-активным нуклидом. Спектр гамма-излучения таких источников линейчатый, т. е. состоит из набора излучения моноэнергетических фотонов с различной плотностью потока энергии излучения. Некоторые источники имеют

непрерывный спектр, что обусловлено торможением бета-частиц в радиоактивном веществе и материале ампулы.

Источники гамма-излучения можно разделить на:

высокоэнергетические, например ^{60}Co, ^{54}Mn; $E_{эф} \geqslant 0{,}8$ МэВ;

среднеэнергетические, например ^{192}Ir, ^{137}Cs; $0{,}3 < E_{эф} < 0{,}8$ МэВ;

низкоэнергетические, например ^{170}Tm, ^{75}Se; $E_{эф} \leqslant 0{,}3$ МэВ. *Эффективной энергией фотонного излучения* $E_{эф}$ называют энергию фотонов такого моноэнергетического излучения, относительное ослабление которого в поглотителе определенного состава и определенной толщины такое же, как у рассматриваемого немоноэнергетического излучения.

При радиационном контроле наиболее широко используют источники на основе следующих четырех нуклидов: ^{170}Tm, ^{192}Ir, ^{137}Cs и ^{60}Co.

Типичные характеристики радионуклидных источников гамма-излучения

Размер активной части, мм	1 ... 20
Мощность экспозиционной дозы излучения на расстоянии 1 м, Кл/(кг·с)	$2 \cdot 10^{-10} \ldots 2 \cdot 10^{-4}$
Период полураспада:	
^{170}Tm	129 дн.
^{192}Ir	74,4 дн.
^{137}Cs	29,6 лет

Радионуклидные источники рентгеновского излучения представляют собой ампулы, заполненные бета-активным нуклидом и материалом мишени. Испускаемое нуклидом бета-излучение, взаимодействуя (затормаживаясь) с материалом мишени, генерирует рентгеновское излучение. Мишень может быть в жидкой фазе, и в этом случае радиоактивное вещество растворено в ней, может быть в порошкообразном состоянии — тогда оно перемешано с ней. Источник может быть также выполнен в виде двух контактирующих между собой пластин, одна из которых — мишень, другая — плоский бета-излучатель. В практике радиационного контроля чаще всего используют источники на основе радионуклидов ^{90}Sr, ^{204}Te, ^{147}Pm, ^{75}Fe. Основные характеристики источников рентгеновского излучения приведены в [32].

Радионуклидные источники быстрых нейтронов конструктивно обычно представляют блок из бериллия габаритными размерами в несколько сантиметров, внутри которого в герметичной ампуле размещен нуклид альфа- или гамма-излучения с энергией частиц, превышающей порог реакций * (α, n) и (γ, n) на бериллии.

* Порог реакции — это минимальная энергия частицы, при которой может идти ядерная реакция.

В зависимости от энергии альфа-частиц максимальная энергия нейтронов, возникающих в реакции (α, n) на бериллии, боре и фторе, не превышает соответственно 10 ... 12, 6 и 3 МэВ, а средняя энергия нейтронов этих источников соответственно равна 3,5 ... 4,5; 2,5 ... 3 и 1 ... 1,5 МэВ.

К источникам нейтронов относятся также источники на основе радионуклидов ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{242}Cm, ^{244}Cm, ^{252}Cf, способные спонтанно делить свои ядра.

Так как в практике радиационного контроля используют в основном тепловые нейтроны, то быстрые нейтроны, выходящие из источников, пропускают через замедлитель, выполненный из легких элементов. Физика процессов замедления такова, что поток тепловых нейтронов становится на три порядка меньше исходного потока быстрых нейтронов.

Основные характеристики радионуклидных источников нейтронов приведены в [32].

Задачи

4.2.1. Показать, что при радиографии ОК рентгеновским аппаратом полуволнового типа время просвечивания должно быть в 2,2 раза больше, чем время просвечивания аппаратом постоянного напряжения при одинаковых амплитуде анодного напряжения и мощности.

Решение

Увеличение анодного напряжения на рентгеновской трубке вызывает увеличение анодного тока. Однако при некотором значении анодного напряжения все электроны, выходящие из катода, попадают на анод, и при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток остается неизменным. Напряжение, при котором достигается насыщение, называется напряжением нание насыщения равно нескольким киловольтам и, следовательно, значительтоком насыщения. Для многих конструкций рентгеновских трубок напряжение насыщения равно нескольким киловольтам, и следовательно, значительно меньше рабочих напряжений. Анодная характеристика, т. е. зависимость анодного тока от анодного напряжения, в этом случае представляет прямую, параллельную оси абсцисс при любых значениях анодного напряжения, отличных от нуля. Такой режим называется «идеальным насыщением». Если ток слабо зависит от напряжения, то говорят о высокой «проницаемости» трубки, если сильно — то о низкой.

У рентгеновских аппаратов полуволнового типа при низкой проницаемости трубки, например при прямо пропорциональной зависимости (в рабочий полупериод) тока от напряжения,

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t \, d\omega t = \frac{I_m}{\pi},$$

т. е. $I_m = 3{,}14\ I$. При идеальном насыщении амплитуда анодного тока I_m в 2 раза больше среднего (за период) значения анодного тока $I : I_m = 2\ I$. Для трубки со средней проницаемостью можно считать $I_m = 2{,}5\ I$,

Мощность, рассеиваемая анодом трубки при идеальном насыщении,

$$P_a = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} 2IU_m \sin \omega t \; d\omega t = \frac{2}{\pi} U_m I = 0{,}64\ U_m I,$$

где U_m — амплитуда анодного напряжения.

Для трубки с низкой проницаемостью

$$P_a = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \pi I U_m \sin^2 \omega t \, d\omega t = 0{,}79 U_m I.$$

Для трубки со средней проницаемостью для указанной мощности принимается соотношение $P_a = 0{,}725\ U_m I$.

Потребуем равенства мощностей, рассеиваемых анодом, для трубок с постоянным и полуволновым режимами работы при равенстве амплитуд анодных напряжений: $U_m I_п = 0{,}725\ U_m I$, где $I_п$ — анодный ток трубки с постоянным анодным напряжением. Из равенства $I_m = 2{,}5\ I$ следует, что $I_m = 3{,}45\ I_п$.

Таким образом, при равных мощностях и равных амплитудах напряжения амплитуда тока для полуволновых аппаратов должна быть в 3,45 раза больше, чем ток для аппарата с постоянным напряжением. В соответствии с п. 4.2.1 для аппарата с постоянным напряжением экспозиционная доза, эффективно действующая на детектор за ОК, пропорциональна $I_п$:

$$D_{01} \sim U_m^n I_п t_1,$$

где $\sim$ — знак пропорциональности, примем $n = 9$; t_1 — время работы аппарата.

В случае полуволнового рентгеновского аппарата при амплитуде переменного напряжения, равной тому же значению U_m, и амплитуде тока I_m, неизменной в течение всего времени излучения трубки, для дозы за ОК справедливо выражение

$$D_{02} \sim U^9 I_2 I_m \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \sin^9 \omega t d\omega t = U_m^9 t_2 \cdot 0{,}13 \cdot 3{,}45 I_п.$$

Из равенства $U^9{}_m I_п t_1 = U^9{}_m t_2 \cdot 0{,}13 \cdot 3{,}45\ I_п$ следует $t_2 = 2{,}2 t_1$ т. е. время просвечивания ОК аппаратом полуволнового типа должно быть в 2,2 раза больше, чем время просвечивания аппаратом постоянного напряжения при той же мощности.

4.2.2. Дать оценку пульсаций

$$\delta_D = \frac{D_{0max} - D_{0min}}{D_{0max}} = \frac{\Delta D_0}{D_{0max}}$$

экспозиционной дозы за ОК, если пульсации анодного напряжения на рентгеновской трубке определяются отношением

$$\delta_u = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max}} = \frac{\Delta U}{U_{max}} \text{ при } \Delta U \ll U_{min} < U_{max}.$$

Решение

Поскольку $D_{0\,max} = kU^n{}_{max}$ $D_{0\,min} = kUU^n{}_{min}$, где k — коэффициент пропорциональности, то

$$\delta_D = \frac{kU_{max}^n - k(U_{max} - \Delta U)^n}{kU_{max}^n} \approx \frac{kn\Delta U U_{max}^{n-1}}{kU_{max}^n} = n\delta_u.$$

§ 4.3. ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

4.3.1. Классификация

Детектором ионизирующего излучения называют чувствительный элемент средства измерений, предназначенный для преобразования энергии ионизирующего излучения в другой вид энергии, удобный для регистрации и/или измерения одной или нескольких величин, характеризующих воздействующее на детектор излучение. При необходимости подчеркнуть вид регистрируемого ионизирующего излучения в обозначение детектора добавляют соответствующий элемент. Например, детектор бета-частиц (краткая форма: β-детектор), детектор рентгеновского излучения (*х*-детектор), детектор нейтронов (*n*-детектор).

По форме представления получаемой *информации детекторы* ионизирующего излучения *разделяют на аналоговые и дискретные; по форме зависимости выходного сигнала детектора от измеряемой физической величины,* характеризующей излучение,— *на пропорциональные и непропорциональные; по состоянию вещества чувствительного объема детектора — на твердотельные, жидкостные и газовые; по методам регистрации ионизирующих излучений на*:

сцинтилляционные (от лат. scintillation — мерцание) — радиолюминесцентные детекторы, в которых используется сцинтиллирующее вещество, испускающее фотоны света под действием ионизирующего излучения и оптически связанное непосредственно или через световод с фоточувствительным устройством;

ионизационные — детекторы, принцип действия которых основан на использовании ионизации в веществе чувствительного объема детектора;

полупроводниковые — ионизационные детекторы, в которых используется электрическое поле для собирания неравновесных носителей зарядов, образованных ионизирующим излучением в полупроводниковом материале чувствительного объема детектора.

Некоторые детекторы представляют информацию о величине, характеризующей излучение, пространственно-усредненную по его чувствительной площади, другие — о распределении указанной величины по его чувствительной площади, и в этом случае они преобразуют радиационное изображение в изображении другого вида и называются радиационными преобразователями. Если радиационное изображение преобразуется в оптическое, то говорят о радиационно-оптическом преобразователе. Изображения могут быть также получены с помощью детекторов первого типа. Один из методов их получения — сканирование. Детектор перемещают в плоскости радиационного изображения и данные запоминают последовательно во всех требуемых точках. После-

довательное поточечное запоминание данных исключает возможность представления динамических радиационных изображений. Другой способ получения изображений — это использование набора детекторов, размещенных друг около друга.

4.3.2. Принципы детектирования

Идеальный детектор должен детектировать каждую поступающую на него ионизирующую частицу, например фотон, и давать точную информацию о ее положении, энергии и времени поступления. Он должен также обеспечивать обработку произвольно больших потоков фотонов. Реальные детекторы не удовлетворяют всем этим требованиям по следующим причинам. Во-первых, не все падающие на детектор фотоны взаимодействуют с детектором. Например, значительная часть рентгеновских фотонов проходит рентгеновскую пленку вообще без какого-либо взаимодействия. Даже те из них, которые с ней взаимодействуют, не обязательно взаимодействуют эффективно. Полезные взаимодействия дают свой вклад в выходной сигнал. Рентгеновский фотон, который полностью поглощается в процессе фотоэлектрического поглощения, допустим, в подложке рентгеновской пленки, так что его энергия не может привести к переводу зерен галоидного серебра в латентную форму, не детектируется. Величину Q — долю падающих на детектор ионизирующих частиц, образующих измеримое событие (например, почернение зерна, возникновение фотоэлектрона, импульс фотонов), дающих вклад в выходной сигнал, называют *квантовым выходом детектора* (*преобразователя*). Квантовый выход равен единице не обязательно у идеального детектора.

Рассмотрим, например, два сцинтилляционных детектора: один идеальный (И), другой — реальный (Р), в которых при взаимодействии с каждым рентгеновским фотоном возникает группа фотонов видимого света, идеально регистрируемых фоточувствительным устройством. Квантовый выход детектора И равен единице, и сконструирован детектор так, что в каждой группе содержится одинаковое число световых фотонов. При регистрации этим детектором рентгеновских фотонов можно точно определить, сколько их поступило на вход детектора. Квантовый выход детектора Р также равен единице, а в каждой группе световых фотонов в среднем содержится столько же световых фотонов, что и в группе детектора И, но число фотонов в группах флуктуирует. Регистрация таким детектором не позволяет точно зафиксировать число поступивших на вход детектора рентгеновских фотонов, хотя можно дать оценку их числа.

Получение информации о качестве ОК при использовании рентгеновского излучения связано с определенными трудностями из-за шума, обусловленного хаотическим характером рас-

пределения фотонов этого излучения во времени и пространстве. Одним из источников шума при регистрации фотонов являются статистические флуктуации их числа в сигнале, который намереваются зарегистрировать за некоторое время в детекторе. Эти флуктуации известны как квантовый шум, фотонный шум или пуассоновский шум. Одним из свойств пуассоновской переменной (шума) является то, что ее среднеквадратическое отклонение равно корню квадратному из среднего. Если сигнал на входе детектора состоит из N независимых фотонов, подчиняющихся распределению Пуассона, то отношение сигнала (среднее число фотонов $\bar{N}$) к шуму (среднее·квадратическое отклонение числа фотонов $\bar{N}$) порядка $\sqrt{\bar{N}}$. Сигнал $S_{\text{вых}}$ на выходе детектора согласуется со случайными флуктуациями рентгеновских фотонов на его входе, и отношение сигнал/шум q порядка $\sqrt{\bar{N}}$.

Детектор Р вследствие дополнительных флуктуаций, связанных с флуктуациями фотонов в сцинтилляционных вспышках, дает меньшее значение q. Так, если на детекторы в среднем поступает по 10^4 фотонов при каждом измерении, то $q_{\text{И}}=\sqrt{10^4}=100$, а $q_{\text{Р}}=90<100$. Значение $q_{\text{Р}}=90$ соответствует «идеальному» детектированию в среднем лишь 8100 фотонов из первичных 10^4 фотонов, зарегистрированных детектором Р.

Проведенный анализ показывает необходимость введения более общего параметра, оценивающего качества детекторов,— *обобщенного квантового выхода системы* регистрации (детектора), который определяют отношением

$$Q_D=(q_{\text{вых}}/q_{\text{вх}})^2, \tag{4.2}$$

где $q_{\text{вых}}$ — отношение сигнал/шум на выходе системы регистрации; $q_{\text{вх}}$ — отношение сигнал/шум на входе системы регистрации. Следовательно, $Q_D=1$ для детектора И, $Q_D=0{,}81$ для детектора Р.

Покажем, в чем состоит отличие величин Q и Q_D устройств регистрации рентгеновского излучения, когда одинаковым входным событиям (регистрация рентгеновских фотонов) соответствуют неодинаковые выходные события (импуьсы тока на выходе фотоумножителя, размеры скоплений непрозрачных зерен серебра в рентгеновской пленке и т. п.), т. е. имеет место только неодинаковость статистического веса сигнальных событий, внесенная регистрирующей системой, что может уменьшить значение $q_{\text{вых}}$. Этот процесс обусловливает соотношение $Q_D \leqslant Q$.

Рассмотрим сначала несколько упрощенный процесс регистрации ионизирующих частиц, когда предполагается квантование значений E с шагом ΔE, центрированных на E_1, E_2, ..., и прохождение каждой градации сигнала по определенным каналам регистратора. Пусть значения $n(E_1)$, $n(E_2)$, ... равны среднему

числу приходящихся на единичный интервал ΔE ионизирующих частиц, создающих события в соответствующих каналах.

В момент окончания регистрации среднее число событий, зарегистрированных во всех каналах (E_1, E_2, ...),

$$S = Qn(E_1)\,\Delta E + Qn(E_2)\,\Delta E + \ldots$$

Однако при регистрации на сигнал в каждом канале часто накладывается статистическая весовая функция $\pi(E)$. В этом случае взвешенное среднее число событий на выходе из системы регистрации

$$S_{\text{вых}} = Q\pi(E_1)\,n(E_1)\,\Delta E + Q\pi(E_2)\,n(E_2)\,\Delta E + \ldots .$$

Однако при наложении весовой функции после регистрации полное число взвешенных шумовых событий на выходе из системы

$$N_{\text{ш вых}} = \{[\pm\pi(E_1)(Qn(E_1)\,\Delta E)^{1/2}]^2 + $$
$$+ [\pm\pi(E_2)(Qn(E_2)\,\Delta E)^{1/2}]^2 + \ldots\}.$$

Если конечные интервалы ΔE заменить на $\mathrm{d}E$, то

$$S_{\text{вых}} = \int_0^{\infty} \pi(E)\,Qn(E)\,\mathrm{d}E,$$

$$N_{\text{ш вых}} = \left(\int_0^{\infty} \pi(E)^2\,Qn(E)\,\mathrm{d}E\right)^{1/2},$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{вых}} = Q^{1/2} \int_0^{\pi} \pi(E)\,n(E)\,\mathrm{d}E \Bigg/ \left[\int_0^{\infty} \pi(E)^2\,n(E)\,\mathrm{d}E\right]^{1/2}.$$

Для падающего потока частиц $\left(\dfrac{S}{N}\right)_{\text{вх}} = \left[\displaystyle\int_0^{\infty} n(E)\,\mathrm{d}E\right]^{1/2}.$

Пренебрегая всеми источниками фонового шума, из (4.2) получаем

$$Q_D = \frac{Q\left[\int_0^{\infty} \pi(E)\,n(E)\,\mathrm{d}E\right]^2}{\int_0^{\infty} \pi(E)^2\,n(E)\,\mathrm{d}E \int_0^{\infty} n(E)\,\mathrm{d}E}. \qquad (4.3)$$

Например, в устройстве для проведения флюорографии, имеющем в своем составе радиационно-оптический преобразователь, светотеневое изображение объекта контроля регистрируется на фотопленку, которая переводит часть падающих на нее свето-

вых фотонов в непрозрачные зерна серебра (их скопления в данном случае являются событиями). При этом имеет место широкий разброс размеров E скоплений этих зерен, так что $E_{\min} \ll E_{\max}$. Пленка регистрирует световые вспышки с выхода преобразователя в соответствии с числом фотонов во вспышке. Поэтому квантовый выход Q определяется квантовым выходом радиационно-оптического преобразователя $Q_р$, а $\pi(E)=E$.

$$Q_D = \frac{Q_р \left[\int\limits_0^\infty E n(E)\, dE \right]^2}{\int\limits_0^\infty E^2 n(E)\, dE \int\limits_0^\infty n(E)\, dE}.$$

Поскольку $n(E)$ — широкая функция ($E_{\min} \ll E_{\max}$), $Q_D \ll Q_р$. Если, однако, скопления имеют одинаковые размеры, $n(E)$ представляют дельта-функцию, тогда $Q_D = Q_р$.

Рис. 4.12. Строение рентгеновской пленки:

1 — защитное покрытие; 2 — зерна галогенида серебра; 3 — желатиновая матрица; 4 — матрица прозрачной основы пленки

При работе сцинтилляционного детектора в токовом режиме амплитуда импульсов тока с выхода фоточувствительного устройства пропорциональна энергии зарегистрированных рентгеновских фотонов: $\pi(E)=E$, при этом Q равно квантовому выходу $Q_с$ сцинтиллятора детектора. В этом случае очень часто $n(E)$ таково, что отношение интегралов дает вклад в (4.3), примерно равный 0,6 ... 0,9, так что $Q_D < Q_л \cdot Q_с$.

При работе этого детектора в счетном режиме $\pi(E)=1$, и хотя $n(E)$ может быть и широкой функцией, $Q_D = Q_л \cdot Q_с$.

4.3.3. Рентгеновская пленка как детектор

Структура *рентгеновской пленки* дана на рис. 4.12. Главная ее часть — эмульсионный слой, представляющий желатиновую матрицу со взвешенными в ней мельчайшими кристалликами галогенида серебра. Обычно прозрачная основа (подложка) пленки, выполненная, например, из ацетата целлюлозы, покрыта эмульсией с обеих сторон, что позволяет повысить квантовый выход пленки без увеличения времени на ее химико-фотографическую обработку.

За время экспозиции из галогенидов фотоэлектрически освобождаются электроны, которые захватываются центрами захвата в кристаллах. Здесь они нейтрализуются подвижными

ионами серебра в зернах галогенидов, что приводит к осаждению очень малого количества металлического серебра, распределенного по эмульсии. После обработки пленки те зерна, которые содержали серебра больше некоторого количества (обычно больше четырех атомов), полностью переводятся в металлическое серебро, а те, которые содержали серебра меньше этого критического количества, удаляются в процессе фиксации. Таким образом, осаждается чистое серебро, распределение которого в эмульсии соответствует радиационному изображению.

Это распределение поглощающих свет частиц серебра образует *фотографическое* (негативное) *изображение.* Процесс обработки можно рассматривать как усиление, при котором несколько фотонов радиационного изображения в конечном итоге порождают зерно серебра, содержащее 10^{10} атомов серебра, и он определяет в свою очередь процессы фотографического детектирования и записи. Фотографический эффект от взаимодействия нейтронов с эмульсиями создается: протонами, полученными в результате упругих столкновений нейтронов с ядрами водорода в желатине и основе пленки, бета-частицами от распада радионуклидов Ag и Br, полученными в результате реакций (n, γ); протонами от реакций ^{14}N (n, p) ^{4}C на тепловых нейтронах.

Сенситометрические характеристики рентгенографических пленок* [28—33]. Информация о радиационном изображении фиксируется на пленке в двоичной форме: зерно серебра либо переводится в латентное (от лат. latens — скрытый) состояние, становясь после обработки непрозрачным, либо не переводится и эмульсия остается локально прозрачной. Макроскопические свойства (например, коэффициент пропускания) должны быть измерены по площади, на которой содержится много зерен, с тем чтобы усреднить микроскопические флуктуации. Именно такие макроскопические свойства рентгеновской пленки являются предметом нашего рассмотрения, при этом степень усреднения флуктуаций при описании различных характеристик рентгеновской пленки будет не одинакова.

Коэффициент пропускания есть отношение светового потока Ф, прошедшего через почернения пленки на прозрачной основе, к световому потоку Φ_0, падающему на него: $\tau = \Phi/\Phi_0$.

Оптическая плотность почернения s радиографической пленки характеризует радиографическое изображение и определяется как десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания: $s = \log(1/\tau)$.

Максимальная оптическая плотность почернения на радиографических пленках может достигать 10 ... 11. В радиационном контроле оптическая плотность составляет, как правило, 2 ... 3.

* Сенситометрия (от позднелат. sensitivus — чувствительный и ...метрия) — учение об измерении фотографических свойств светочувствительных материалов.

Эту характеристику обычно измеряют на элементах снимка размером 1 ... 3 мм с помощью денситометров, а на элементах снимка площадью до 0,01 мм² — с помощью микроденситометров и микрофотометров.

Экспозиция излучения, приводящая к определенному почернению пленки,— это дозированное по переносу фотонов, переносу энергии количество излучения, воздействующего на пленку. Переносом фотонов/энергий называют соответственно число фотонов/их энергию, падающих/падающую на единицу площади пленки (фотонов/м², Дж/м²). Экспозицию часто измеряют в единицах экспозиционной дозы (рентгенах).

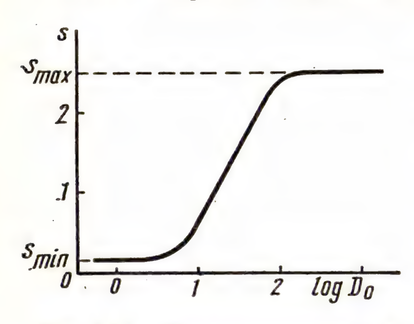


Рис. 4.13. Идеализированная характеристическая кривая рентгеновской пленки

Характеристическая кривая рентгеновской пленки представляет графическую зависимость оптической плотности почернения от логарифма экспозиции (экспозиционной дозы D_0). Несколько идеализированная кривая, имеющая три линейных участка, показана на рис. 4.13. При очень малых экспозициях плотность пленки s_0 мала и не зависит от значения экспозиции, ее иногда называют фоновой плотностью или плотностью вуали и фона. Далее имеется участок, на котором плотность и логарифм экспозиции $\log D_0$ связаны почти линейно — это так называемый прямолинейный участок кривой (область нормальных экспозиций). На третьем участке (область соляризации) весь галогенид серебра переходит в металлическое серебро. Детектор насыщается, и выходной сигнал s_{max} больше не является функцией экспозиции. *Градиент характеристической* кривой, т. е. производная оптической плотности по десятичному логарифму экспозиции, является важным параметром пленки. Здесь мы будем использовать обозначение γ для градиента прямолинейного участка характеристической кривой, называемого коэффициентом контрастности, и g_s для обозначения градиента в некоторой произвольной точке кривой.

На прямолинейном участке плотность почернения пленки описывается выражением

$$s=\gamma \log (D_0/D_{00}). \tag{4.4}$$

Воспользовавшись соотношением $s=\log (1/\tau)$, получаем

$$\tau=(D_0/D_{00})^{-\gamma}=kD_0^{-\gamma},$$

где $k=D^{\gamma}_{00}$. Если τ и D_0 рассматривать соответственно как сигналы на входе и выходе детектора, то можно сделать вывод

о том, что пленка является типичным непропорциональным детектором, поскольку значения γ для большинства пленок лежат в диапазоне 0,6 ... 3. Однако любая нелинейная система является линейной при достаточно малых изменениях входного и выходного сигналов (ΔD_0 и $\Delta\tau$ соответственно) и для некоторой точки характеристической кривой можно записать выражение

$$\Delta\tau/\tau = -g_s \Delta D_0/D_0, \qquad (4.5)$$

которое означает, что величина g_s — это усиление контраста для низкоконтрастных радиационных изображений.

Если продифференцировать соотношение (4.4) с учетом (4.5), можно получить $\Delta s = 0{,}434\gamma D_0/D_0$. Для рентгеновских пленок значение g_s обычно лежит в интервале 2 ... 3. Полезным называют интервал экспозиций, ограниченный точками минимального полезного градиента на конечном и начальном участках характеристической кривой.

Чувствительность (число чувствительности) *рентгеновской пленки* определяют по характеристической кривой как величину, обратную экспозиционной дозе, необходимой для получения оптической плотности $s = 0{,}85 + s_0$. Если, например, экспозиционная доза для пленки при указанной плотности составила 0,2 Р, то ее чувствительность к излучению равна 5 $Р^{-1}$. Чувствительность пленки обычно определяют при напряжении на рентгеновской трубке 80 кВ. При очень длительных экспозициях и низких уровнях мощности экспозиционных доз, а также при импульсном облучении потоками значительной плотности оптическая плотность меньше, чем при тех же экспозиционных дозах при промежуточных временах экспонирования. Такой эффект называют *эффектом невзаимозаместимости.*

Невзаимозаместимость при высоких плотностях потока энергии излучения возникает из-за того, что электрическое поле захваченного электрона замедляет захват следующих электронов до тех пор, пока мигрирующий ион серебра не нейтрализует это поле. В течение времени миграции иона серебра остальные фотоэлектроны не могут быть нейтрализованы и вынуждены искать другой центр захвата или выпадают из процесса образования латентного изображения вследствие рекомбинации. Невзаимозаместимость при низких плотностях потока энергии возникает вследствие того, что единичный атом серебра термически нестабилен — время его жизни составляет примерно 1 с. Однако агрегат из двух атомов серебра стабилен в течение нескольких дней, и это приводит к сублатентному состоянию зерна. Вероятность перевода зерна в латентное состояние (для этого требуется примерно четыре атома серебра) невелика, если средняя скорость образования атомов серебра мала по сравнению со скоростью тепловой диссоциации, что тем самым замедляет образование стабильного сублатентного изображения. Невзаимоза-

местимость при малой плотности потока фотонов наблюдается и для рентгеновских пленок.

Однако когда пленка экспонируется непосредственно рентгеновским излучением, эффекты невзаимозаместимости не проявляются, поскольку для перевода зерна в латентное состояние необходимо всего одно его взаимодействие с рентгеновским фотоном.

Зернистость — это визуально обнаруживаемая неоднородность на равномерно экспонированном и проявленном участке рентгеновской пленки. Если рассматривать экспонированную и обработанную рентгеновскую пленку с увеличением, используя, например, лупу, то вследствие разброса микрокристаллов эмульсии по чувствительности и размерам, случайного характера их расположения, статистических флуктуаций числа рентгеновских фотонов, падающих на выбранный участок, наблюдается дискретное изображение с зернистой структурой.

Под гранулярностью G понимают флуктуации оптической плотности почернения равномерно экспонированного и проявленного фотоматериала, оцениваемого инструментальными методами. Например, если пленку сканировать вдоль прямой в микроденситометре с круглой сканирующей апертурой, то выходным сигналом будет напряжение, которое флуктуирует около некоторого среднего значения, что связано с изменением коэффициента пропускания пленки и соответственно $\bar{\tau}$ с дисперсией $\sigma^2{}_\tau$.

Экспериментально была установлена важная закономерность: $\sigma_s{}^2F_s = \mathrm{const}$, где σ_s — среднее квадратическое отклонение оптической плотности почернения; F_s — площадь апертуры сканирования. В связи с этим гранулярность рентгеновских пленок

$$G = \sigma_s F_s^{1/2}. \quad (4.6)$$

Обобщенный квантовый выход детектирования рентгеновской пленки определяется соотношением (4.2), которое можно представить в виде

$$Q_D = \frac{(S/N_ш)^2_{вых}}{(S/N_ш)^2_{вх}} = \frac{(S_{вых}/S_{вх})^2}{(N_{ш\,вых}/N_{ш\,вх})^2}. \quad (4.7)$$

Здесь будем считать входным сигналом число фотонов, падающих на элемент пленки, а выходным — результирующую оптическую плотность почернения. При радиационном контроле отношение $S_{вых}/S_{вх}$ обычно рассматривают как дифференциальный передаточный множитель, так что для площадки A пленки сигнал $S_{вх}$ представляет разность F_1A и F_2A при близких экспозициях F_1 и F_2 и, следовательно,

$$S_{вх} = (F_2 - F_1)\,A = \Delta FA, \quad (4.8)$$

а $S_{вых} = \Delta S = S_2 - S_1$ — соответствующая разность оптических плотностей почернения.

С учетом (4.8) можно записать

$$\frac{S_{вых}}{S_{вх}}=\frac{\Delta S}{A\Delta F}=\frac{\Delta S}{\Delta \ln F}\ \frac{1}{FA}=\frac{0,434g}{AF}, \qquad (4.9)$$

где $F=(F_1+F_2)/2$. Передаточное отношение для шума относится также к площадке A. Входной шум равен среднему квадратическому отклонению числа рентгеновских фотонов, падающих на площадку A:

$$N_{ш\,вх}=(FA)^{1/2}, \qquad (4.10)$$

а выходной шум — стандартному отклонению измененной оптической плотности почернения

$$N_{ш\,вых}=\sigma_s. \qquad (4.11)$$

Объединяя (4.7), (4.9) — (4.11), получаем $Q_D=(0{,}434g_s)^2:$ $:FA\sigma_s^2$ или с учетом (4.6)

$$Q_D=(0{,}434g_s)^2/(FG^2). \qquad (4.12)$$

Это соотношение показывает, что обобщенный квантовый выход рентгеновской пленки максимален при экспозициях облучения, близких тем, которые дает максимальный градиент характеристической кривой. Фактически же оптимальная для Q_D экспозиция меньше из-за наличия F и G в знаменателе выражения (4.12).

Эксперименты показывают, что для большинства пленок $Q_D\approx 1\%$. Объективно такое низкое значение Q_D для рентгеновских пленок является необходимым следствием требования низкой плотности вуали при длительном хранении.

Функция передачи модуляции рентгеновской пленки $F_м$ определяет качество полученного на ней снимка. Пусть входной сигнал представляет распределение переноса энергии излучения $\Psi(x)$ в плоскости рентгеновской пленки (энергия на единицу площади). Для произвольной пространственной частоты ρ_x с периодом ρ_x^{-1} вдоль x

$$\Psi(x)=\bar{\Psi}+\Delta\Psi\cos(2\pi\rho_x x),$$

где для упрощения выкладок рассматриваются малые изменения Ψ только в одном направлении.

Модуляция входного сигнала обычно определяется отношением

$$M_{вх}=\frac{\Psi_m\ \ -\Psi_{min}}{\Psi_{max}+\Psi_{min}}=\frac{\Delta\Psi}{\Psi}. \qquad (4.13)$$

Изменения коэффициента пропускания и оптической плотности почернения рентгеновской пленки выражаются аналогичными функциями:

$$\tau(x)=\bar{\tau}-\Delta\tau\cos(2\pi\rho_x x),$$

$$s(x)=\bar{s}+\Delta s\cos(2\pi\rho_x x).$$

Соответствующие модуляции выходного сигнала описываются в виде

$$M^{\tau}_{\text{вых}}=\Delta\tau/\bar{\tau}, \quad M^{s}_{\text{вых}}=\Delta s. \qquad (4.14)$$

При низких пространственных частотах ($\rho_x \to 0$) можно пренебречь конечными размерами зерен эмульсии и дуффузией света в ней, поэтому можно записать:

$$M^{\tau}_{\text{вых}}(\rho_x \to 0)=g_s\Delta\Psi/\bar{\Psi}=g_s M_{\text{вх}},$$

$$M^{s}_{\text{вых}}(\rho_x \to 0)=0{,}434 g_s\Delta\Psi/\bar{\Psi}=0{,}434 g_s M_{\text{вх}}.$$

Поскольку функция передачи модуляции рентгеновской пленки определяется как $F_{\text{м}}=M_{\text{вых}}/M_{\text{вх}}$, то при $\rho_x \to 0$

$$F^{\tau}_{\text{м}}(\rho_{\text{ц}} \to 0)=g_s, \qquad F^{s}_{\text{м}}(\rho_x \to 0)=0{,}434 g_s.$$

И для того чтобы обеспечить $F_{\text{м}}(\rho_x \to 0)=1$, необходимо провести нормировку:

$$F^{\tau}_{\text{м}}(\rho_x)=g_s^{-1}\,|M^{\tau}_{\text{вых}}/M_{\text{вх}}|;$$

$$F^{s}_{\text{м}}(\rho_x)=(0{,}434 g_s)^{-1}\,|M^{k}_{\text{вых}}/M_{\text{вх}}|. \qquad (4.15)$$

Следовательно, после нормировки

$$F^{\tau}_{\text{м}}(\rho_x)=F^{s}_{\text{м}}(\rho_x).$$

Таким образом, используя (4.13)—(4.15), можно получить

$$F_{\text{м}}(\rho_x)=\frac{1}{g_s}\;\frac{\Delta\tau}{\bar{\tau}}\Bigg/\frac{\Delta\Psi}{\bar{\Psi}}=\frac{\Delta s}{0{,}434 g_s}\Bigg/\frac{\Delta\Psi}{\Psi}.$$

Здесь рассмотрена ситуация, когда сигнал на рентгеновской пленке может быть описан зависимостью коэффициента передачи модуляции от пространственной частоты. Рассмотрим далее физические явления, которые определяют вид этой зависимости.

В идеальной детектирующей системе функция рассеяния точки $f(r)$ должна описываться дельта-функцией и, следовательно, $F_{\text{м}}(\rho_x)=1$, так как функция передачи модуляции любой системы представляет Фурье-преобразование функции рассеяния точки этой системы, т. е.

$$F_{\text{м}}(\rho)=\mathcal{F}_2\{f(r)\}=\int_{\infty}[\exp(-2\pi j\rho r)]\,\mathrm{d}^2 r,$$

где $\mathcal{F}_2$ — двухмерный Фурье-оператор, нижний индекс ∞ относится к бесконечной области интегрирования

$$\int_{\infty}\mathrm{d}^2 r=\int_0^{\infty} r\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\theta=\int_{-\infty}^{+\infty}\mathrm{d}x\int_{-\infty}^{+\infty}\mathrm{d}y;$$

$\rho=\sqrt{\rho_x^2+\rho_y^2}$ — двухмерная пространственная частота.

Однако распространение света через пленку сопровождается диффузией, дифракцией, эффектами отражения и преломления. Относительный вклад этих механизмов в уширение функции рассеяния зависит в основном от распределения зерен эмульсии по размерам, однако это уширение можно ослабить, вводя в желатин поглощающие красители, уменьшающие ореол рассеяния.

Поскольку диффузия света, вызываемая преломлением и дифракцией на отдельных зернах, является доминирующим процессом уширения функции рассеяния, последняя имеет эффективный размер, примерно равный толщине слоя эмульсии. Функция рассеяния линии $l(x)$ для рентгеновской пленки достаточно точно описывается с помощью выражения, найденного эмпирическим путем, имеющим вид

$$l(x) = (1/2L)\exp(-|x|/L),$$

где L — постоянная для данного вида эмульсии. Соответствующая функция рассеяния точки

$$f(r) = (1/\pi L)\,\overline{K}_0(\overline{|r|/L}),$$

где K_0 — функция Бесселя третьего рода нулевого порядка. Соответствующая этим функциям функция передачи модуляции

$$F_м(\rho) = [1 + (2\pi L\rho)^2]^{-1}.$$

Типы рентгеновских пленок. Выпускаемые промышленностью рентгеновские пленки делятся на безэкранные и экранные. Первые используются без усиливающих экранов или совместно с металлическими усиливающими экранами. Размер зерен их эмульсии в несколько раз меньше, чем у экранных пленок. Экранные пленки имеют меньший градиент характеристической кривой. Особый класс представляют цветовые рентгеновские пленки. В [32] представлены основные рентгеносенситометрические характеристики отечественных рентгеновских пленок.

Детектор люминесцентный экран — рентгеновская пленка. В таком детекторе рентгеновское излучение поглощается материалом люминофора, который в свою очередь стимулирует при поглощении рентгеновского фотона выход большого числа фотонов с энергией 1 ... 5 эВ. Эти фотоны и экспонируют рентгеновскую пленку. Улучшение некоторых характеристик этого детектора по сравнению с рентгеновской пленкой возникает по двум причинам. Во-первых, увеличивается квантовый выход детектора благодаря добавлению в люминофоры ионов тяжелых металлов и большей толщине люминофора по сравнению с рентгеновской пленкой, и, во-вторых, большое число низкоэнергетичных фотонов (вплоть до нескольких тысяч на один рентгеновский фотон) экспонирует несколько зерен. Предельная разрешающая способность современных люминесцентных экранов более 10 пар лин/мм.

4.3.4. Полупроводниковая пластина как детектор

Полупроводниковая пластина представляет полированную проводящую подложку (алюминий, латунь, стекло или бумага с проводящим покрытием) с нанесенным на нее с одной стороны тонким слоем (десятки — сотни микрометров) полупроводникового материала (аморфный селен, антрацен и др.). В настоящее время в качестве полупроводникового материала для таких детекторов широко используют только аморфный селен с толщиной слоя 30 ... 400 мкм. В твердом состоянии селен известен в трех модификациях: аморфный, моноклинный и гексагональный. Аморфный селен состоит из беспорядочно ориентированных кольцеобразных и спиралеобразных цепочек атомов. В [33] приведены основные физические характеристики аморфного селена.

В обычном состоянии полупроводниковая пластина нечувствительна к ионизирующему излучению. Для ее «очувствления» требуется нанести на полупроводниковый слой электрический заряд, заземляя проводящую подложку. Полупроводниковую пластину помещают в светонепроницаемую камеру зарядного устройства и перемещают под электродом или электродами, имеющими потенциал 5 ... 12 кВ относительно подложки. Коронный разряд, возникающий между электродом и полупроводниковой пластиной, заряжает полупроводниковый слой до потенциала 0,6 ... 1,3 кВ.

К параметрам полупроводниковых пластин, оказывающим влияние на качество светового изображения, относят чувствительность к ионизирующему излучению, относительный спад рабочего потенциала в темноте, эффект усталости полупроводниковых слоев. Экспонирование заряженных полупроводниковых слоев производится так же, как экспонирование рентгеновских пленок. Время от момента зарядки пластин до экспонирования не должно превышать 10 .. 15 мин, так как постоянно происходит спад потенциала пластин.

При облучении селеновых пластин в слое полупроводника возникают свободные носители тока, которые под действием электрического поля, приложенного к слою во время зарядки, дрейфуют к его поверхности и нейтрализуют заряд, нанесенный во время зарядки, при этом в достаточно широком интервале мощностей экспозиционных доз спад потенциала происходит по экспоненте и, следовательно, зависимость потенциала пластины V от экспозиции D_0 можно записать в виде $V = V_0 \exp(-s_e D_0)$, где V_0 — начальный потенциал пластины перед экспонированием; s_e — постоянная для данной пластины и для определенной энергии излучения.

Зависимость потенциала от логарифма экспозиционной дозы излучения может служить характеристической кривой для се-

ленового слоя. Градиент этой кривой описывается выражением

$$g_U = \left| \frac{dV}{d \lg D_0} \right| = 2{,}3V \ln \frac{V_0}{V}.$$

Максимального значения он достигает при $V = V_0 e^{-1}$ или $D_0 = 1/S_e$. Максимальное значение градиента называют *коэффициентом контрастности* γ_V, который линейно возрастает с ростом начального потенциала слоя.

Чувствительность к ионизирующему излучению определяется величиной, обратной экспозиционной дозе, необходимой для спада рабочего потенциала пластины на 250 В. Обычно она составляет 50 ... 400 $Р^{-1}$.

Заряженный полупроводниковый слой в зависимости от его свойств и потенциала поверхности в темноте теряет свой заряд. Для селеновых слоев относительный спад рабочего потенциала в темноте за 1 мин составляет 5 ... 15%.

В результате многократного экспонирования и электризации селеновых слоев изменяются их физические свойства, т. е. появляется так называемый эффект «усталости» слоев. Один из определяющих факторов усталости слоев — уменьшение их чувствительности к ионизирующему излучению. Обычно число циклов экспонирования до наступления усталости составляет не более четырех, время восстановления утомленной пластины около 20 мин.

4.3.5. Полупроводниковые детекторы

Особенности работы полупроводникового детектора определяются физическими свойствами полупроводниковых материалов, используемых при их изготовлении. Электрические свойства полупроводников определяются распределением энергетических уровней.

Зона, образуемая валентными электронами, называется валентной; имеются зона запрещенных для электронов состояний с шириной $\Delta E_д$ и зона проводимости. При такой структуре зон для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется некоторая энергия $E > \Delta E_д$. Если энергетический барьер $\Delta E_д$ достаточно велик, то слабое внешнее электрическое поле не вызывает протекания электрического тока. Если, однако, энергетический барьер не очень велик, то некоторые электроны из валентной зоны в результате тепловых флуктуаций могут переходить в зону проводимости и создавать электрический ток. Такие материалы называются полупроводниками. Ионизирующая частица, попадая в полупроводник, способствует переводу электронов из валентной зоны в зону проводимости или в расположенные выше незаполненные зоны. В результате взаимодействия частицы с полупроводником возникают электроны в

первоначально незаполненных зонах и дырки в зонах, которые до прихода частиц были заполнены. После вторичных взаимодействий и диссоциации энергии при фононных взаимодействиях за очень короткое время (около 10^{-12} с) все электроны оказываются на дне зоны проводимости, а дырки — на верху валентной зоны.

К полупроводниковым материалам, используемым в детекторах ионизирующего излучения, предъявляют следующие требования. Материал должен быть достаточно плотным и иметь достаточно большой атомный номер для того, чтобы в небольшом объеме можно было затормозить частицу или поглотить фотоны. Необходимо, чтобы при взаимодействии с материалом частиц и фотонов образовывалось достаточно большое число свободных носителей заряда, так как с увеличением числа носителей уменьшается относительная флуктуация их числа, что приводит к увеличению обобщенного квантового выхода детектора. Чтобы получить значительный сигнал во внешней цепи, носители должны быть способны достаточно быстро перемещаться под действием внешнего поля, приложенного к полупроводниковому материалу. Необходима высокая подвижность носителей и минимальная концентрация ловушек, захватывающих носители в процессе их дрейфа к электродам. Для регистрации слабого сигнала, создаваемого излучением, необходимо, чтобы материал детектора имел минимальный ток утечки при достаточно высоких напряжениях, прикладываемых к материалу.

Важное свойство материала, применяемого для изготовления полупроводниковых детекторов, заключается в возможности создания блокирующих контактов, препятствующих поступлению свободных носителей в рабочую область детектора, когда положительный электрод не инжектирует в чувствительную область детектора дырки, а отрицательный — в электроны.

Проблема создания блокирующих контактов решается либо созданием n^+- и p^+-областей в полупроводнике путем диффузии или ионного легирования соответствующими примесями, либо подбором металлов, используемых в качестве контактных материалов. При этом p^+-контакт используется как отрицательный электрод, а n^+ — как положительный.

Физические свойства некоторых полупроводниковых материалов, используемых для изготовления детекторов, рассмотрены в [33].

Полупроводниковые детекторы можно классифицировать по различным признакам, например:

а) по функциональным возможностям (для определения энергии, координатно-чувствительные и др.);

б) *по типу используемого полупроводника* (Si, Ge, CaAs, GdTe, HgT и т. д.);

в) *по способу изготовления* (поверхностно-барьерные, диффузионные и др.).

Если частица или фотон поглотились в чувствительном объеме детектора, то на электродах детектора собирается индуцированный заряд $q=eN$. Дисперсия числа генерированных носителей заряда N определяется выражением $\overline{(N-\overline{N})^2}=F\overline{N}$, где F — фактор Фано. Для сцинтилляционных детекторов $F=1$, что обусловлено наличием лишь одного канала, поглощающего энергию (образование фотоэлектронов в фоточувствительном устройстве). Процесс здесь простой — квант света независимо порождает или не порождает фотоэлектрон, что приводит к выполнению закона Пуассона ($F=1$).

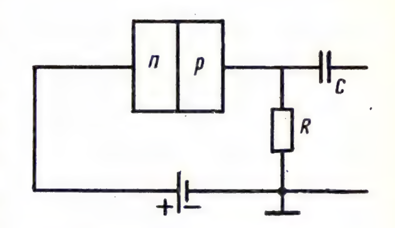


Рис. 4.14. Электрическая схема подключения полупроводникового детектора

В полупроводниковом детекторе заряд возникает в результате генерации электронно-дырочных пар, при этом на образование пары необходимы затраты энергии $\varepsilon \approx 3$ эВ. Следует отметить, что на образование пары электрон — положительный ион в газонаполненных детекторах необходимо затратить около 30 эВ, а на образование фотоэлектрона в сцинтилляционных детекторах около 300 эВ. Если бы вся энергия E первичного фотона расходовалась на освобождение электронов (и образование дырок), то число носителей заряда составило бы $N=E/\varepsilon$; флуктуации N были бы близки нулю, т. е. $F=0$. В полупроводниковых детекторах примерно 2/3 энергии E уходит на генерацию фононов по другому каналу — на возбуждение колебаний решетки, и, следовательно, возникают флуктуации в передаче энергии по этим двум каналам, в результате $0<F<1$. Так, для кремниевых детекторов $F=0{,}05$; дисперсия равна 1/20 той, которая была бы в случае пуассоновской статистики. Электрическая схема подключения полупроводникового детектора представлена на рис. 4.14.

4.3.6. Усилитель радиационного изображения с электронно-оптическим преобразователем

Усилителем радиационного изображения называют радиационно-оптический преобразователь, в котором за счет дополнительных источников энергии, не связанных с ионизирующим излучением, в процессе облучения происходит радиационно-оптическое преобразование с коэффициентом усиления яркости более единицы.

Коэффициент усиления яркости радиационно-оптического преобразователя определяется отношением яркости выходного

экрана преобразователя к яркости эталонного флюоресцентного экрана при одинаковых заданных условиях радиационного облучения преобразователя и флюоресцентного экрана.

Усилителем радиационного изображения с *электронно-оптическим преобразованием* называют усилитель радиационного изображения, в котором усиление яркости изображения, сформированного ионизирующим излучением на флюоресцентном экране, происходит в помощью электронно-оптического преобразователя, в котором фотоэлектроны ускоряются электрическим полем, а затем фотоэлектронное изображение преобразуется в видимое на катодно-люминесцентном экране.

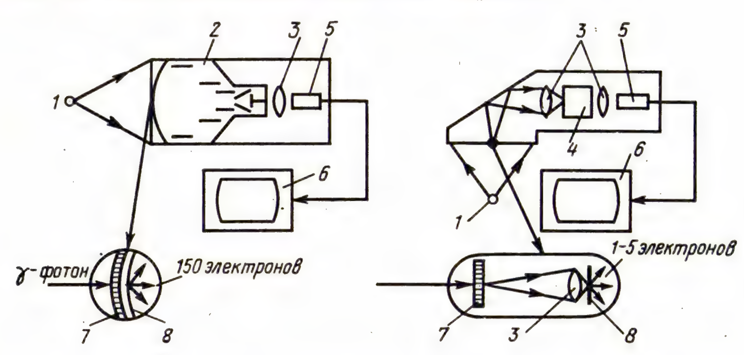


Рис. 4.15. Структурные схемы усилителей радиационного изображения с радиационными (*а*) и световыми (*б*) ЭОП:

1 — источник излучения; *2* — радиационный ЭОП; *3* — объектив; *4* — световой ЭОП; *5* — передающая телевизионная трубка; *6* — видеоконтрольное устройство; *7* — рентгенолюминофор; *8* — фотокатоды

В настоящее время широкое распространение получили усилители радиационного изображения со световыми и радиационными электронно-оптическими преобразователями (соответственно ЭОП и РЭОП). С позиций преобразования светового излучения, возникающего во входных экранах этих усилителей, между ними существует фундаментальное различие. Из рис. 4.15 видно, что оптическая связь между фотокатодом и входным экраном в этих усилителях не одинакова. В то время как в РЭОП каждый рентгеновский квант, например, с энергией 60 кэВ порождает около 150 электронов, усилитель с ЭОП дает только 1 ... 5 электронов. В результате в указанном звене последнего усилителя происходит значительная потеря информации о радиационном изображении и увеличение шума. На рис. 4.16 схематично представлена конструкция РЭОП с внутренним входным экраном, например, из CsI. Этот экран может быть выполнен в виде вытянутых примыкающих друг к другу монокристаллов небольших поперечных размеров, которые образуют световоды, что сводит к минимуму боковое рассеяние света и обеспечивает

создание толстого слоя люминофора с высокими поглощением и пространственным разрешением. Входной экран из CsI, установленный в таких усилителях, поглощает 50% излучения, которое ослабляется в два раза слоем алюминия толщиной 7 мм.

Пространственное разрешение входного экрана подобного типа около 5 пар лин./мм, а эффективность преобразования равна приблизительно 1000 квантам света на один поглощенный квант рентгеновского излучения энергией 50 кэВ. Квантовый выход нанесенного на входной экран фотокатода приближенно равен 15%, что позволяет получить в итоге около 150 электронов на один поглощенный рентгеновский квант.

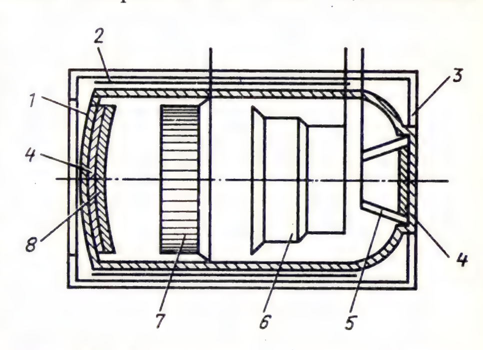


Рис. 4.16. Конструкция усилителя с внутренним входным экраном:

1 — колба; *2* — магнитный экран; *3* — защитный экран; *4* — люминофор; *5* ... *7* — фокусирующие и ускоряющие электроды; *8* — фотокатод

Усиление яркости изображения происходит за счет увеличения энергии фотоэлектронов. Увеличение энергии и формирование электронных траекторий обеспечивается электронно-оптической системой с электростатической фокусировкой.

Преобразование энергии электронов в кванты света происходит внутри выходного катодолюминесцентного экрана с высоким пространственным разрешением и соответствующей спектральной характеристикой, Обычно используются люминофоры ZnCdS с максимумом излучения на длине волны 530 нм. Энергетическая эффективность преобразования, равная 10%, соответствует созданию 1200 квантов света на один электрон энергией 30 кэВ. Используя материал, состоящий из очень мелких зерен (1 мкм), методом осаждения из раствора можно изготовить выходной экран с пределом разрешения 50 пар лин./мм.

Экраны усилителя и элементы электростатической фокусировки размещены внутри герметичной вакуумированной колбы, изготовленной по технологии стекло — металл. Для облегчения эксплуатации и гарантирования стабильности характеристик колба размещена в корпусе, что обеспечивает точное базирование оптической системы, передающей изображение, и в некоторых случаях — подсоединение источников электрического напряжения, подаваемого на различные электроды. Корпус содержит магнитный и защитный экраны, что обеспечивает безопасность при работе с усилителем. Магнитный экран снижает влияние магнитных полей на качество изображения. Свинцовый защит-

ный экран снижает радиационную нагрузку на персонал.

Основные метрологические параметры усилителей [1]: размер рабочего поля, масштаб преобразования, коэффициент радиационно-оптического преобразования, коэффициент усиления яркости радиационно-оптического преобразования, предел разрешения, динамический диапазон, предел плотности потока энергии, яркость темнового фона, геометрические искажения радиационного изображения, степень чистоты поля зрения, зонные характеристики качества изображения, коэффициент передачи контраста, временное разрешение.

Типичные характеристики современных РЭОП

Размер рабочего поля, мм	150 ... 300
Масштаб преобразования	1 : 10
Коэффициент радиационно-оптического преобразования, $\frac{кд/м^2}{мР \cdot с}$	100 ... 2000
Предел разрешения, пар лин./мм	2 ... 5
Коэффициент передачи контраста	0,8 ... 0,9

Функцию передачи модуляции $D(\rho_w)$ радиационного ЭОП можно аппроксимировать с помощью обобщенного выражения

$$D(\rho_w) = \exp - (\rho_w/\rho_d)^q,$$

где ρ_w — пространственная частота в плоскости входного экрана РЭОП; ρ_d — характеристическая частота; $q = 1 \dots 2$; $q = 1{,}5$ для РЭОП. Величина ρ_d — это та пространственная частота, при которой $D(\rho_d) = e^{-1}$ независимо от значения q, которое, в свою очередь, определяет спад функции передачи модуляции в окрестности $\rho_w = \rho_d$.

4.3.7. Рентгеновские видиконы

В качестве радиационных преобразователей можно использовать передающие телевизионные трубки типа видикон, если в них в качестве фотопроводящего материала использовать оксид цинка ZnO, аморфный селен Se, сернистую сурьму Sb_2S_3, оксид свинца PbO. Типовая схема рентгеновского видикона и его внешний вид представлены на рис. 4.17. На алюминиевой планшайбе размещается фотопроводящий слой толщиной 150... 350 мкм. Планшайба играет роль сигнальной пластины видикона. Для фокусировки электронного луча, считывающего потенциальный рельеф с мишени, используется система из двух анодов. Между анодами создается «электронная линза», фокусирующая электронный луч на поверхности мишени. Сетка обеспечивает подход электронов по нормали к мишени, что способствует повышению четкости изображения. Развертка коммутирующего электронного пучка осуществляется с помощью отклоняющих катушек.

При коммутации медленными электронами (коэффициент вторичной эмиссии $\sigma<1$) левая поверхность коммутируемого элемента фотопроводящего слоя приобретает потенциал катода электронного прожектора. В цепи сигнальной пластины включены нагрузочный резистор $R_н$ и источник напряжения $(+U)$.

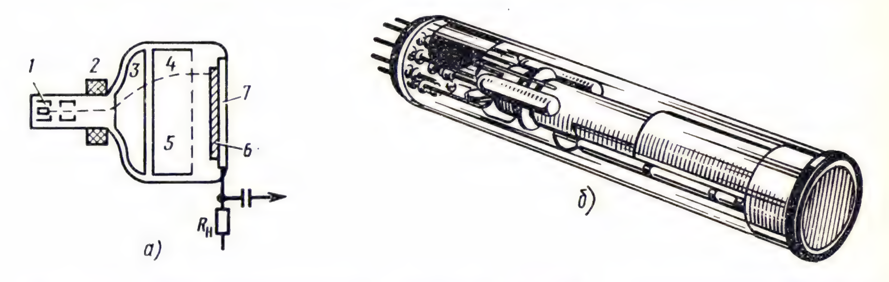


Рис. 4.17. Схема рентгеновского видикона ЛИ-444 с электростатистической фокусировкой (*а*) и его внешний вид (*б*):

1 — электронный прожектор; *2* — отклоняющие катушки; *3*, *4* — ноды; *5* — выравнивающая сетка; *6* — фотопроводящий слой; *7* — алюминиевая планшайба

После ухода коммутирующего пучка электроны из проводящего канала начинают перемещаться к положительному полюсу источника питания, в результате потенциал левой стороны фотопроводящего слоя повышается. Изменение потенциала за время между двумя коммутациями пропорционально плотности потока рентгеновского излучения на входе коммутируемого элемента

Таблица 4.2

Технические характеристики рентгеновских видиконов

Характеристика	Тип видикона		
	ЛИ-447	ЛИ-473	ЛИ-444
Чувствительность контроля, %	2	4	0,5
Разрешение, мкм	40	60	25
Диаметр рабочего поля, мм	150	90	18
Толщина контролируемых изделий, мм:			
сталь	4 ... 10	4 ... 10	4 ... 8
алюминий	10 ... 80	10 ... 80	10 ... 60

слоя. На левой стороне фотопроводящего слоя образуется потенциальный рельеф. Во время коммутации элемента слой приобретает потенциал катода. Ток перезаряда емкости элемента проходит по нагрузочному резистору, образуя на нем сигнал от радиационного изображения.

Основные технические характеристики отечественных рентгеновидиконов представлены в табл. 4.2.

Небольшая толщина (не более 0,3 мм) фоточувствительного слоя рентгеновидиконов не позволяет применять их для регистрации фотонов высоких энергий и низких плотностей их потока [менее 10^6 фотонов/(мм^2·с)].

4.3.8. Многоэлементные и газонаполненные детекторы

Первыми многоэлементными детекторами с газовым наполнением были многопроволочные пропорциональные камеры. Низкая эффективность регистрации фотонов рентгеновского излучения и плохая развязка по рассеянному излучению между соседними элементами детектора привели к тому, что их заменили многоэлементные детекторы на основе ионизационных камер. В настоящее время широко используются линейные или однокоординатные детекторы, составленные из большого числа (сотен или тысяч) идентичных ионизационных камер.

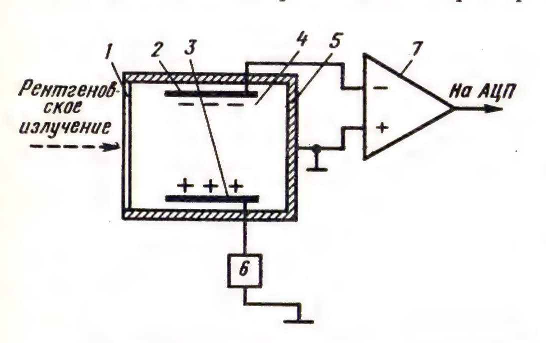


Рис. 4.18. Структурная схема ксеноновой ионизационной камеры:

1 — входное окно; *2* — анод; *3* — катод; *4* — ксенон под высоким давлением (10 ... 20 Па); *5* — стенки камеры; *6* — источник высокого напряжения; *7* — предварительный усилитель

Ионизационная камера (ИК) с газовым наполнением (рис. 4.18) представляет два плоскопараллельных (или коаксиальных цилиндрических) металлических электрода *2*, *3*, размещенных в герметичном корпусе *1*, *5* с газовой средой *4*. Электроды электрически связаны с источником высокого напряжения *6*. Под действием рентгеновского излучения газ, заключенный в межэлектродном пространстве, ионизируется, в результате образуются электронно-ионные пары. К электродам приложено постоянное напряжение, создающее в межэлектродном пространстве электрическое поле, под действием которого происходит разделение зарядов разного знака: электроны и отрицательные ионы движутся и собираются на аноде *2*, а положительные ионы — на катоде *3*. Сила тока, возникшая в цепи ИК, служит мерой плотности потока энергий (фотонов) излучения и зависит от объема ИК, давления газа в ней и других физических характеристик.

В ионизационной камере электроны, освобожденные излучением, из-за низкого электрического поля в камере (порядка

10^3 В/мм) не могут приобрести достаточной кинетической энергии для ионизации газа в промежутке между электродами. Ионизация стимулируется только за счет энергии рентгеновских фотонов. Суммарную ионизацию можно измерить. Так, если все ионы достигнут электродов, то в цепи возникнет ток насыщения $i_0 = neV$, n — число пар ионов, генерируемых излучением в единице объема камеры за 1 с; e — заряд электрона; V — рабочий объем камеры.

Пусть P_0 — мощность дозы излучения в чувствительном объеме камеры, тогда $i_0 = eV\rho P_0/\varepsilon$, где ρ — плотность газа, заполняющего камеру; ε — энергия ионообразования. Следовательно, ток пропорционален мощности дозы излучения. Теоретически ток насыщения можно обеспечить при больших напряженностях электрического поля в рабочем объеме камеры. На практике важно знать, насколько измеряемый ток i близок i_0. Отношение $i/i_0 = f$ называют *эффективностью собирания ионов*. Оно уменьшается с увеличением мощности дозы излучения, а напряженность электрического поля E, обеспечивающая заданную эффективность собирания ионов, пропорциональна $\sqrt{P_0}$.

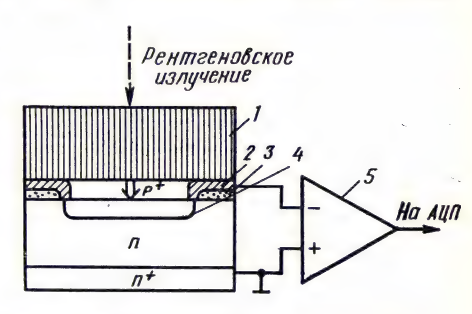


Рис. 4.19. Структурная схема детектора сцинтиллятор-фотодиод:

1 — сцинтиллятор; *2* — металлический контакт; *3* — SiO_2, *4* — *p-n*-переход; *5* — предварительный усилитель

Быстродействие ИК определяется временем полного собирания ионов, которое зависит от скорости перемещения наименее подвижных ионов в электрическом поле. В многоэлементных ионизационных детекторах с межэлектродными расстояниями около 1 мм быстродействие порядка 10^{-5} с.

4.3.9. Детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов, контактирующих с фотодиодами

Структурная схема одного из каналов такого детектора представлена на рис. 4.19. Сцинтилляционные кристаллы *1* обычно выполняют из иодида цезия и натрия (CsI, NaI), вольфрамата кадмия ($CdWO_4$) и германата висмута (кристаллы $Bi_4(GeO)_3$). Контактирующие с ними полупроводниковые фотодиоды, например из кремния *n*-типа с имплантантом *p*-типа, компактны, обладают высокой прочностью, нечувствительны к магнитным полям, питаются от низковольтных источников, работают при комнатной температуре и имеют высокий квантовый выход в широком спектральном диапазоне.

Ток в фотодиоде с *p-n*-переходом, регистрирующим световое излучение сцинтиллятора, в котором поглотилась энергия рентгеновского излучения, может быть определен соотношением $i = e\eta\xi\beta E/\varepsilon$, где e — заряд электрона; η — энергетический выход рентгенолюминесценции сцинтиллятора; ξ — эффективность собирания света сцинтиллятора на фотодиод; β — коэффициент собирания носителей тока *p-n*-переходом; ε — средняя энергия, необходимая для создания электронно-дырочной пары. Эффективность собирания света может быть повышена в результате

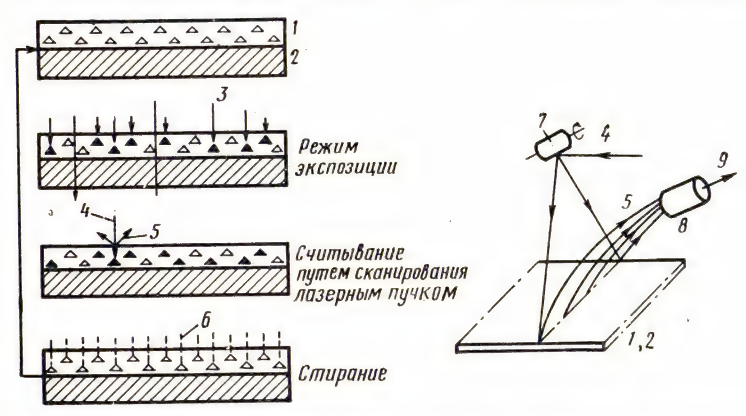


Рис. 4.20. Принцип работы детектирующей системы на основе использования люминесценции, стимулированной лазером:

1 — фотостимулируемые кристаллы фосфора; *2* — пластмассовая пластинка; *3* — рентгеновские фотоны; *4* — фотоны лазерного пучка; *5* — люминесцентные фотоны; *6* — световые фотоны; *7* — сканирующее зеркало; *8* — фотоумножитель; *9* — сигнал с выхода ФЭУ; △ — кристаллы с ионами Eu^{2+}; ▲ — кристаллы с Eu^{3+}

либо полного внутреннего отражения люминесцентных фотонов от нерабочих плоскостей сцинтиллятора, либо применения диффузно или зеркально отражающих покрытий. Лучшими материалами для создания хорошей оптической связи между сцинтиллятором и *p-n*-переходом служат кремнийорганические компаунды.

К преимуществам рассматриваемых детекторов относится простота градуировки, которая является следствием долговременной стабильности (0,1%) и линейности фотодиода.

4.3.10. Детектор на основе люминесценции, стимулированной лазером

Основным элементом системы служат небольшие кристаллы фотостимулируемого фосфора $BaBr:Eu^{2+}$, распределенные в органическом связующем веществе, нанесенном на пластину. Толщина слоя фосфора около 150...400 мкм, его плотность $\rho \approx$

$\approx 5,2$ г/см³. Фотостимулируемый фосфор способен запоминать часть поглощенной в нем энергии рентгеновского, ультрафиолетового, электронного излучения и т. п., а также испускать под действием видимого или инфракрасного излучения фотоны люминесцентного излучения, число которых пропорционально поглощенной энергии. Рис. 4.20 поясняет принцип работы детектирующей системы, а рис. 4.21 — зонную структуру фосфора.

Процесс испускания такого излучения называют фотостимулированной люминесценцией (ФСЛ). Механизм ФСЛ данного фосфора следующий. При взаимодействии рентгеновского излучения с кристаллами фосфора часть ионов Eu^{2+} ионизируется до Eu^{3+}, а освобождаемые при этом электроны при переходе в зону проводимости захватываются F^{+}-центрами кристалла. При облучении последнего видимым светом захваченные в F^{+}-центрах электроны снова переходят в зону проводимости и возвращаются к ионам Eu^{3+}, которые при этом превращаются в возбужденные ионы Eu^{2+*}, затем люминесцирующие. ФСЛ-излучение эффективно испускается под действием гелий-неонового лазера. Спектр этого излучения лежит в диапазоне, где квантовый выход фотоумножителя высок.

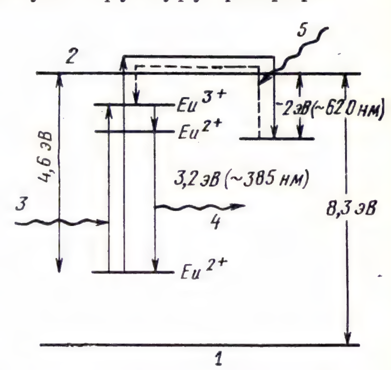


Рис. 4.21. Зонная структура фосфора:

1 — валентная зона; *2* — зона проводимости; *3* — рентгеновские фотоны; *4* — люминесцентный фотон; *5* — фотон лазерного пучка

Детектирующая система на основе ФСЛ обладает высоким квантовым выходом при взаимодействии с рентгеновским излучением. Обобщенный квантовый выход системы Q_D при энергии рентгеновских квантов до 20 кэВ и диапазоне экспозиций $10 \ldots 10^3$ фотонов на элемент изображения соответствует идеальному детектору, т. е. $Q_D \approx 1$. Пространственное разрешение детектирующей системы может составлять несколько десятков микрометров.

Скрытое изображение, запоминаемое на пластине детектора, сохраняется в течение нескольких часов. Считывание этого изображения производится путем сканирования пучком гелий-неонового лазера ($\lambda = 632,8$ нм), которое освобождает ФСЛ-излучение ($\lambda \approx 385$ нм). Сканирование может осуществляться лазерным пучком, который отклоняется сканирующим зеркалом при синхронном перемещении пластины перпендикулярно сканирующему пучку. При этом ФСЛ-излучение с помощью световода может стимулировать на выходе фотоумножителя аналоговый сигнал, который затем обрабатывается и преобразуется с помо-

щью АЦП во временные последовательности цифровых сигналов. Скорость сканирования в настоящее время составляет около 14 мкс на элемент изображения при размере элемента примерно 100×100 мкм. Цифровые сигналы могут обрабатываться, запоминаться и преобразовываться в световые изображения на дисплее.

Задачи

4.3.1. Оценить обобщенный квантовый выход Q_D комбинированного детектора типа сцинтиллятор — ФЭУ со схемой дискриминации выходных импульсов, имеющей два порога: нижний E_1 и верхний E_2; весовая функция в промежутке между порогами $\pi(E)=1$, а вне окна E_2-E_1 дискриминации $\pi(E)=0$.

Решение

Согласно (4.7)

$$Q_D=\frac{Q_\text{ф}\left[\int\limits_{E_2}^{E_1} n(E)\,\mathrm{d}E\right]^2}{\int\limits_{E_1}^{E_2} n(E)\,\mathrm{d}E\int\limits_0^\infty n(E)\,\mathrm{d}E}=Q_\text{ф}\,\frac{\int\limits_{E_1}^{E_2} n(E)\,\mathrm{d}E}{\int\limits_0^\infty n(E)\,\mathrm{d}E},$$

где $Q_\text{ф}$ — квантовый выход фотокатода ФЭУ.

Следовательно, при счете импульсов в ограниченном интервале E $Q_D<Q_\text{p}$.

4.3.2. Оценить гранулярность рентгеновской пленки, обобщенный квантовый выход которой $Q_D=0{,}01$ при энергии рентгеновских фотонов около 100 кэВ; коэффициент контрастности $\gamma=3$; чувствительность 20 Р$^{-1}$.

Решение

В соответствии с соотношением (4.2) $Q_D=(0{,}434\gamma)^2/(FG^2)$, откуда следует, что гранулярность

$$G=\sqrt{(0{,}434\gamma)^2/(FQ_D)}=0{,}434\gamma/\sqrt{FQ_D}\,.$$

Экспозиционной дозе $\frac{1}{20}$ Р соответствует перенос $F\approx1\cdot10^9$ фотонов/см^2 и, следовательно, $G=4$ мкм.

4.3.3. Предполагая, что предельная разрешающая способность радиационного ЭОП $\rho_\text{пр}=4$ пар лин./мм соответствует значению ФПМ $D\ (\rho_\text{пр})=$ $=0{,}05$, оценить значение характеристической пространственной частоты ρ_d этого РЭОП.

Решение

Функция передачи модуляции РЭОП определяется обобщенным выражением

$$D\,(\rho_w)=\exp-(\rho_w/\rho_\text{d})^q,$$

где $q=1{,}5$. Следовательно, $\exp-(\rho_\text{пр}/\rho_\text{d})^{1,5}=0{,}05$ или $\rho_\text{d}=\rho_\text{пр}/2{,}1\approx2$ пары лин./мм.

§ 4.4. РАДИОГРАФИЯ

4.4.1. Радиография на фотопленку. Оборудование и области применения [31]

Радиография — это метод радиационного неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения ОК в радиографический снимок или записи этого изображения в запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. Метод используется для

Таблица 4.3

Дефекты технологических процессов и отклонения от заданных размеров, выявляемые радиационными методами

Контролируемый объект	Выявляемые дефекты или отклонения от заданных размеров
Слитки и отливки	Трещины, газовые раковины, пористость, рыхлоты, усадочные раковины; земляные включения, шлаковые включения, неслитины, ликвации
Сварные соединения, полученные сваркой плавлением	Трещины (продольные и поперечные) в наплавленном и основном металлах, непровары (сплошные и прерывистые), шлаковые включения, включения вольфрама, пористость, подрезы, проплавы, прожоги, смещения кромок раковины
Сварные соединения, полученные точечной и роликовой сваркой	Трещины, пористость, раковины, выплески, непровары (в сплавах с резко выраженной неоднородностью литой зоны и в соединениях с контрастирующими материалами)
Паяные соединения	Отсутствие припоя, трещины в припое и основном материале, пористость, инородные включения, подрезы основного металла
Клепаные соединения	Трещины в теле заклепки или основном материале, зазоры между телом заклепки и основным материалом, изменения формы тела заклепки
Сборочные единицы, агрегаты	Неправильная сборка, зазоры, перекосы и разрушение внутренних элементов, посторонние объекты во внутренних полостях, степень заполнения внутренних полостей
Стенки и внутренние элементы деталей и агрегатов	Отклонения от формы, отклонения от заданных размеров

обнаружения макроскопических нарушений сплошности или однородности материалов ОК, возникающих при изготовлении, а также для выявления дефектов, появившихся в процессе эксплуатации машин, механизмов и т. п. В табл. 4.3 представлены дефекты технологических процессов и отклонения от заданных размеров, выявляемые радиационными методами.

Физика взаимодействия ионизирующих излучений с веществом такова, что радиография, как и другие радиационные методы контроля, малоинформативна для выявления расслоений, слипаний, закатов, заковов, волосовин и других дефектов планарной геометрии с малым раскрытием в заготовках и деталях из металлов, получаемых пластическим деформированием (ковка, штамповка и т. п.).

Эффективность различных методов радиационного контроля определяется способностью обнаруживать реальные дефекты в объекте контроля и их производительностью. Средние размеры наиболее мелких дефектов и производительность радиографического метода контроля при толщине объекта 2 ... 500 мм таковы:

Размер выявляемого дефекта, мм:	
в направлении просвечивания	0,1 ... 5
поперечный	0,01 ... 0,2
Производительность контроля:	
слитков, отливок и т. п., м²/ч	0,5 ... 0,01
сварных соединений и т. п., м/ч	1 ... 3

Для осуществления радиографии необходимы следующие средства: источник излучения; преобразователь излучения; дополнительные принадлежности контроля (маркировочные знаки и т. п.); средства механизации и автоматизации контроля; средства, защищающие людей от воздействия ионизирующих излучений.

4.4.2. Основные технологические операции при радиографии на фотопленку

Радиографический контроль реализуется через последовательность технологических операций:

конструктивно-технологический анализ пригодности ОК для радиографирования;

подготовка к радиографированию — выбор источника излучения, режима его работы и фотоматериалов;

подготовка ОК к радиографированию — маркировка снимков, установка эталонов чувствительности и кассеты с пленкой;

выбор параметров и схемы контроля;

радиографирование ОК;

химико-фотографическая обработка экспонированного фотоматериала;

расшифровка снимков и оформление полученных результатов.

Подготовка к радиографированию. При выборе источника излучения сначала в соответствии с атомным номером элемента и плотностью материала ОК, а также с учетом его конструктивных особенностей определяют суммарную длину участков ОК, через которые должно пройти первичное рентгеновское излучение, и по данным табл. 4.4—4.8 [32] определяют вид необходимого излучения и основную его характеристику (напряжение на рентгеновской трубке, радионуклид, энергию ускоренных электронов). Конкретный тип источника устанавливается с учетом требований на абсолютную (относительную) чувствительность контроля, технологической маневренности и производительности контроля.

Таблица 4.4

Напряжение на рентгеновской трубке в зависимости от толщины просвечиваемого сплава, мм

U, кВ, не более	Сплав на основе				U, кВ, не более	Сплав на основе			
	железа	титана	алюминия	магния		железа	титана	алюминия	магния
20	0,04	0,1	0,5	1,5	120	7	18	59	105
40	0,4	1	5	14	150	10	24	67	120
50	0,7	2	12	22	200	21	47	100	160
60	1	3	20	35	250	27	57	112	200
80	2	6	38	57	300	33	72	132	240
100	5	10	54	80	400	46	106	210	310

Таблица 4.5

Напряжение на рентгеновской трубке в зависимости от толщины просвечиваемых тугоплавких материалов, мм

U, кВ, не более	Жаропрочный сплав ($Z=31$; $\rho=8,2$ г/см^3)	Молибден ($Z=42$; $\rho=10,1$ г/см^3)	Вольфрам ($Z=74$; $\rho=19,3$ г/см^3)	U, кВ, не более	Жаропрочный сплав ($Z=31$; $\rho=8,2$ г/см^3)	Молибден ($Z=42$; $\rho=10,1$ г/см^3)	Вольфрам ($Z=74$; $\rho=19,3$ г/см^3)
150	5	2	0,3	300	21	11	1,9
200	12	5	0,8	400	43	35	18
250	16	9	1,3	1000	143	115	60

После выбора типа источника и энергии его излучения определяют, в каких условиях будет производиться контроль: в заводской стационарной лаборатории или в цеховых, монтажных

полевых или других нестационарных условиях. По справочным данным подбирают такие аппараты, диапазон напряжений на рентгеновской трубке которых перекрывает требуемое напряжение. Выясняют предпочтительную форму рабочего пучка излучения; возможности размещения излучателя источника в соответствии с оптимальной схемой просвечивания. Окончательный

Таблица 4.6

Напряжение на рентгеновской трубке в зависимости от толщины просвечиваемого неметалла, мм

U, не более, кВ	$Z=14$, $\rho=1{,}39$ г/см³	$Z=6{,}2$, $\rho=1{,}37$ г/см³	$Z=5{,}5$, $\rho=0{,}92$ г/см³
20	1	10	15
40	8	70	100
60	25	120	170

выбор делают по результатам сравнительной оценки технико-экономической эффективности применения всех тех источников, которые технически подходят для решения поставленной задачи с учетом чувствительности и производительности контроля.

Таблица 4.7

Тип радионуклида в зависимости от толщины просвечиваемого сплава, мм

Радионуклид	Сплав на основе			
	железа	титана	алюминия	магния
Tm 170	1 ... 20	2 ... 40	3 ... 70	10 ... 200
Se 75	5 ... 30	7 ... 50	20 ... 200	30 ... 300
Ir 192	5 ... 100	10 ... 120	40 ... 350	70 ... 450
Cs 137	10 ... 120	20 ... 150	50 ... 350	100 ... 500
Co 60	30 ... 200	60 ... 300	200 ... 500	300 ... 700

Выбор рентгенографических пленок, усиливающих экранов и вариантов зарядки кассет. При выборе пленки необходимо учитывать, что для выпускаемых рентгенографических пленок с повышением коэффициента контрастности и разрешающей способности, т. е. с повышением чувствительности к дефектам, падает квантовый выход пленки (возрастает время просвечивания). Пленки экранного типа применяют в тех случаях, когда при их использовании выявляются все недопустимые по ТУ на ОК дефекты. Если на снимках, полученных на пленках экранного типа, недопустимые дефекты не выявляются, последовательно переходят к пленкам марок РТ-1, РТ-4М или ТНТМ-1

и РТ-5. При контроле объекта ответственного назначения обычно используют пленки РТ-5, с помощью которых выявляют мелкие трещины в сварных, паяных, клепаных и других соединениях в процессе производства изделий, дефекты усталостного происхождения (коррозия, трещины).

При реализации радиографического контроля используют следующие варианты зарядки кассет (по ходу излучения): КПК, КМПМК, КЛПЛК, где К — стенка кассеты, М — металлический усиливающий экран, Л — люминесцентный усиливающий экран,

Таблица 4.8

Энергия ускоренных электронов в бетатроне в зависимости от толщины просвечиваемого сплава, мм

E, МэВ	Сплав на основе			
	свинца	железа	титана	алюминия
6	30 ... 60	50 ... 100	90 ... 190	150 ... 310
9	40 ... 110	70 ... 180	130 ... 350	220 ... 570
18	50 ... 110	100 ... 220	190 ... 430	330 ... 740
25	60 ... 120	130 ... 250	250 ... 490	480 ... 920
30	60 ... 150	150 ... 350	290 ... 680	570 ... 1300
35	60 ... 180	150 ... 450	290 ... 880	610 ... 1800

П — рентгенографическая пленка. Если радиографируется ОК с большими перепадами толщины, допускается использовать по две пленки разной чувствительности к излучению в одной кассете, т. е. варианты зарядок: КППК, КМППМК, КМПМПМК, КЛПЛЛПЛК, при использовании ускорителей — КМЛПЛМК.

Подготовка ОК к радиографированию. Области на деталях и узлах ОК, подлежащих радиографированию, очищают от шлака, земли, масла и т. п. и размечают цветным карандашом или мелом на участки, соответствующие размеру снимка, и маркируют в соответствии с ГОСТ 15843—79. При установке кассет с пленкой в зону просвечивания их защищают от постороннего рассеянного и вторичного излучения с задней стороны листовым свинцом толщиной 1 ... 3 мм.

В практике радиационного контроля для оценки качества изображений на снимках используют эталоны чувствительности — установленные нормативными документами по форме, составу и способу применения тест-образцы с заданным распределением контролируемого параметра. Так, проволочный эталон — это набор проволочек установленной длины и диаметра, канавочный эталон — пластина с канавками установленной формы и размеров, пластинчатый эталон — пластина с цилиндрическими отверстиями установленной формы и размеров. Указанные эле-

менты эталонов изготовляют с заданной точностью из материала, по химическому составу аналогичного химическому составу ОК.

Эталоны чувствительности устанавливают на краю размеченного участка поверхности ОК, обращенной к источнику излучения. При этом проволочные эталоны устанавливают на сварной шов с направлением проволок поперек шва; канавочные и пластинчатые эталоны — рядом со швом, вдоль него.

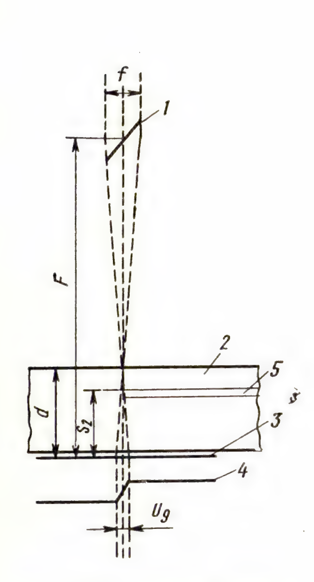


Рис. 4.22. Схема формирования геометрической нерезкости радиационного изображения полости с резким краем:

1 — источник с фокусным пятном; 2 — ОК; 3 — рентгеновская пленка; 4 — профиль плотности потока фотонов в радиационном изображении; 5 — полость

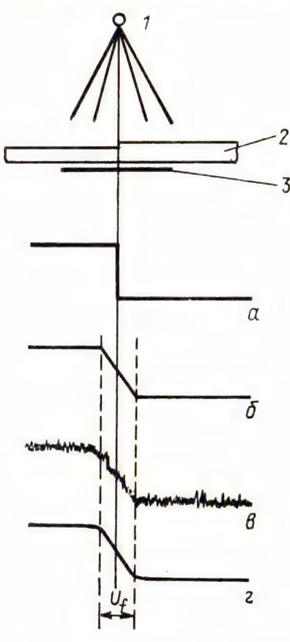


Рис. 4.23. Схема формирования нерезкости преобразования радиационного изображения:

1 — точечный источник излучения ($f \to 0$); 2 — ОК со скачкообразным изменением толщины; 3 — рентгеновская пленка; а — профиль оптической плотности почернения пленки при $U_f = 0$; б — при теоретических расчетах; в — с учетом зернистости пленки; г — усредненная

Размеры рентгеновской пленки должны обеспечивать получение полного изображения размеченного участка, включая маркировочные знаки и эталоны чувствительности, поэтому ширина пленки H и ее длина L должны быть не менее чем на 20% больше ширины h и длины l контролируемого участка.

Выбор параметров и схемы просвечивания. Параметры и схемы контроля определяют геометрические условия просвечивания: различного рода нерезкости изображений, увеличение изображений и т. п.

Геометрическая нерезкость U_g радиационного изображения обусловлена конечными размерами фокусного пятна источника ионизирующего излучения и геометрическими параметрами устройства, формирующего радиационное изображение. На рис.

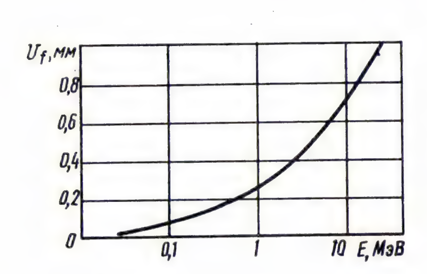


Рис. 4.24. Усредненная по экспериментальным данным зависимость нерезкости преобразования U_f для рентгеновских пленок от энергии фотонов радиационного изображения

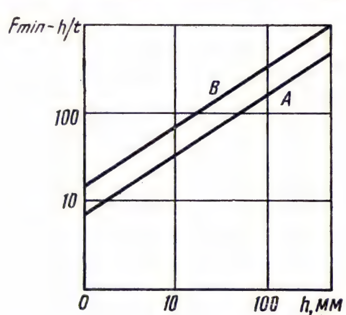


Рис. 4.25. Графики, определяющие минимальные фокусные расстояния при радиографии ОК в зависимости от их толщины:

A — рентгеновское оборудование общего назначения; *B* — рентгеновское оборудование высокого разрешения

4.22 видно, что геометрическая нерезкость радиационного изображения полости в ОК с резким краем на оси рабочего пучка излучения, формируемого источником с фокусным пятном f, определяется соотношением

$$U_g = \frac{fS_2}{F - S_2} = f(m - 1),$$

при этом максимальное значение $U_{g\,\max} = fd/(F-d)$, где m — проекционное увеличение.

Нерезкость преобразования U_f радиационного изображения возникает при преобразовании исходного радиационного изображения двух смежных полей со скачкообразным изменением физического параметра изображения на границе раздела этих полей (рис. 4.23). Она определяется микроструктурой пленки (экрана) и физикой взаимодействия фотонов первичного излучения с веществом пленки (экрана). На нерезкость преобразования влияет не только средний размер зерна пленки, но и энергия фотонов, поскольку она определяет длину пробега электронов в эмульсии. На рис. 4.24 представлена усредненная по экспериментальным данным зависимость нерезкости преобразования U_f от энергии E фотонов.

Нерезкость рассеяния радиационного изображения U_s возникает в материале контролируемого объекта и/или в материале детектора радиационного излучения. *Динамическая нерезкость радиационного изображения* U_d возникает при относительном перемещении (в процессе преобразования изображения) источника излучения, просвечиваемого ОК и преобразователя изображения.

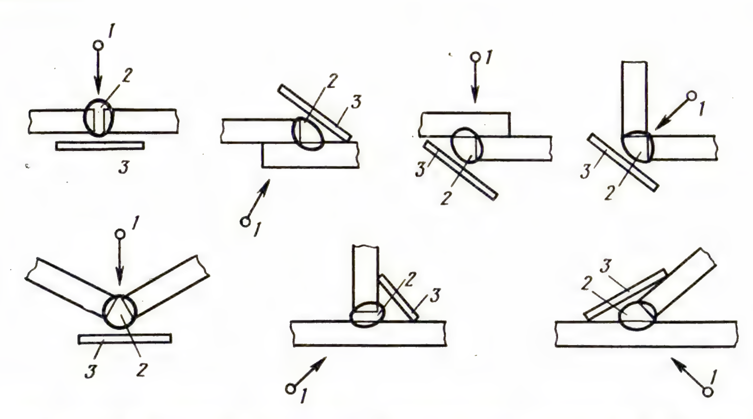


Рис. 4.26. Схема контроля стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых соединений:

1 — источник излучения; *2* — контролируемый участок ОК; *3* — кассета с пленкой

Общая нерезкость $U_т$ определяется совместным действием всех видов нерезкостей и формой неоднородности в ОК, аналитически она часто записывается в виде эмпирического равенства

$$U_т=\sqrt[3]{U_g^3+U_f^3+U_s^3+U_d^3}$$

или

$$U_т=\sqrt{U_g^2+U_f^2+U_s^2+U_d^2}.$$

Чтобы получить снимок хорошего качества, общая нерезкость должна быть уменьшена до некоторого минимума. Кроме ограничений на значение общей нерезкости при контроле учитываются и ограничения на другие параметры. Так, отечественные нормативные документы требуют, чтобы относительное увеличение размеров изображений дефектов, расположенных со стороны источника излучения (по отношению к дефектам, расположенным со стороны пленки), не превышало 1,25.

Часто для расчета фокусного расстояния используют соотношение $F=h(U_т+f)/U_т$, где $U_т$ — общая нерезкость; h — толщина ОК; f — размер фокусного пятна, при этом должно выполняться неравенство $F \geqslant F_{min}$, где F_{min} определяется графиками $(F_{min}—h)/f$ (рис. 4.25).

Схемы просвечивания сварных соединений. Сварные соединения, применяемые в различных конструкциях, просвечиваются по типовым схемам ГОСТ 7512—82 (рис. 4.26). При контроле кольцевых сварных соединений цилиндрических и сферических пустотелых изделий следует, как правило, использовать схемы просвечивания ОК через одну стенку (схемы рис. 4.27, *а, б, е—з*).

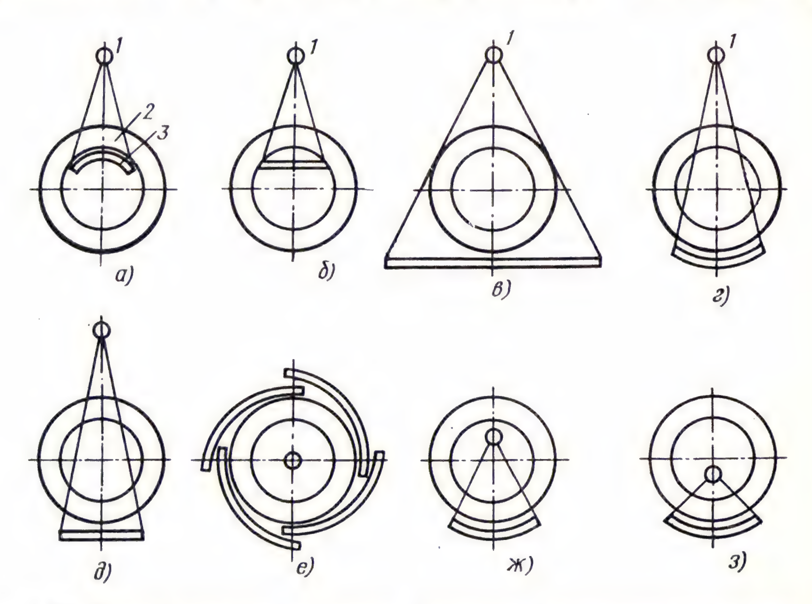


Рис. 4.27. Схемы контроля кольцевых (стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых) сварных соединений:

1 — источник излучения; *2* — контролируемый участок; *3* — кассета с пленкой

При этом рекомендуется использовать схемы просвечивания с расположением источника излучения внутри ОК. Ширина снимков и фокусное расстояние (рис. 4.28) должны быть выбраны такими, чтобы уменьшение оптической плотности на любом участке изображения не превышало единицы, а угол $\alpha < 45°$. Следует также учитывать то, что при радиографическом контроле не гарантируется выявление непроваров и трещин, плоскость раскрытия которых образует с направлением просвечивания угол более 6° (рис. 4.29).

Схемы просвечивания литых деталей — литых изделий типа полых тел вращения или отливок Г-, Т- и Х-образной формы (рис. 4.30) — выбирают по тем же правилам, что и при контроле сварных конструкций.

При радиографии изогнутых сечений вогнутая сторона должна быть обращена к источнику, если это возможно, а гибкая кассета должна повторять контур отливки. При радиографии флан-

цев в отливках пленки должны закрывать фланец, цилиндрическую стенку и угол между ними. Пленку следует размещать под фланцем и вкладывать внутрь отливки. Очень важно, чтобы на снимках было четкое изображение места соединения фланца и стенки. При просвечивании фланцевых отливок необходимо по возможности исключать рассеянное излучение, приводящее к

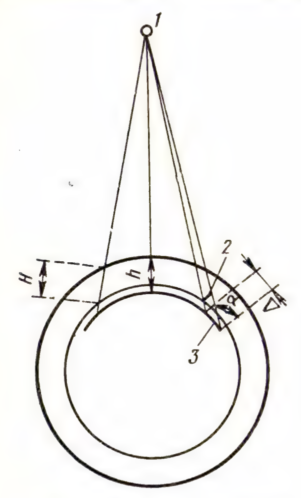


Рис. 4.28. Схема контроля трубы, в которой оптическая плотность изображения по краям снимка уменьшена относительно его центра; угол между направлением излучения и нормалью к пленке в пределах контролируемого за одну экспозицию участка трубы превышает 45°:

1 — источник излучения; *2* — дефект типа канальной поры; *3* — пленка; Δ — размер изображений дефекта на снимке

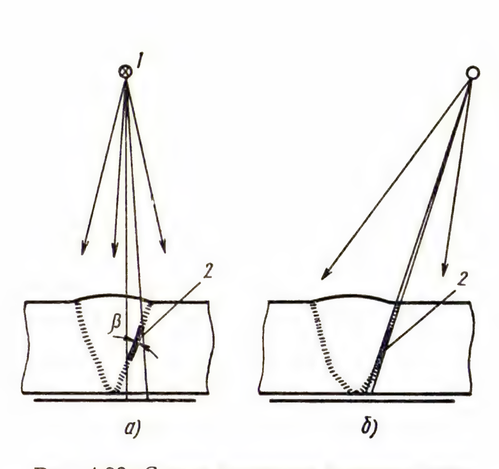


Рис. 4.29. Схема контроля сварного шва:

1 — источник излучения; *2* — непровар по кромке шва; *а* — угол β между плоскостью непровара и направлением просвечивания превышает 6°; *б* — $\beta<6°$

деградации изображений дефектов на снимках. Экспозиция должна быть выбрана для средней радиационной толщины сечения ОК и при необходимости следует использовать многопленочную зарядку кассет. При просвечивании корпусов клапанов рабочий пучок излучения направляют так, чтобы обеспечить наилучшее проецирование критических внутренних зон на пленку.

При просвечивании литых изделий с резким перепадом толщин (рис. 4.31) для выравнивания оптической плотности по участкам снимка применяют твердые, насыпные и жидкостные

компенсаторы. Твердые компенсаторы, как правило, изготовляют из того же материала, что и ОК, и такой конфигурации, которая позволяет создать одинаковую радиационную толщину по всему ОК. Для работы с насыпным компенсатором (порошок, дробь и т. п.) ОК помещают в свинцовую маску и засыпают им пространство между стенкой маски и ОК. В этом случае плотности материала ОК и компенсатора не должны значительно отличаться друг от друга. Для полых ОК или ОК с отверстиями применяют компенсаторы на основе растворов (смесей) различных веществ, химически нейтральных с материалом ОК.

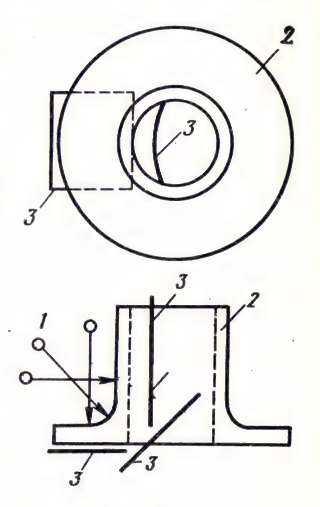


Рис. 4.30. Типовые схемы просвечивания отливки с фланцем:

1 — источник излучения; 2 — ОК; 3 — кассета с пленкой

Режимы просвечивания рентгеновским излучением ОК из сплавов на основе железа, титана, алюминия и магния определяют по номограммам типа показанных на рис. 4.32 [32] и корректируют с учетом материала ОК и условий просвечивания, а также качества применяемых рентгеновских пленок, усиливающих экранов и других факторов. Номограммы — это графики зависимости экспозиций (мА·с, мА·мин) от толщины просвечиваемого материала при различных напряжениях на рентгеновской трубке. Из нескольких возможных значений напряжения выбирают оптимальное исходя из загрузки рентгеновского оборудования и требуемой чувствительности контроля. Обычно режимы выбирают так, чтобы время просвечивания не превышало 10 мин.

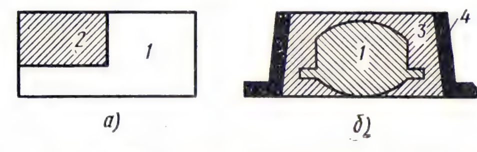


Рис. 4.31. Схемы размещения компенсаторов при радиографии ОК Г-образной формы (*а*) и ОК с тонким фланцем (*б*):

1 — ОК; 2 — твердый компенсатор; 3 — жидкий компенсатор; 4 — ванна

Если контролю подвергаются объекты из материалов, не приведенных в табл. 4.4—4.6, необходимо найти значения толщины данного материала, эквивалентной толщине материала, приведенного в таблицах. Эквивалентную толщину подлежащих радиографированию ОК рассчитывают по формуле

$$h_{эк} = \mu_т (E_{эф})\, h_т / \mu (E_{эф}), \tag{4.16}$$

где $E_{эф}$ — эффективная энергия излучения; $\mu(E_{эф})$ и $h_{эк}$ — линейный коэффициент ослабления излучения и эквивалентная толщина для материала, не приведенного в таблице; $\mu_т(E_{эф})$ и $h_{эк}$ — линейный коэффициент ослабления излучения и толщина материала, приведенного в табл. 4.4—4.6. Эффективная энергия $E_{эф}$ для излучения рентгеновских аппаратов с напряжением до

1 МэВ вдали от скачков фотоэлектрического поглощения численно равна 2/3 максимального напряжения на рентгеновской трубке.

В выражении (4.16) в качестве материала, приведенного в табл. 4.4—4.8, следует использовать для расчетов ближайший по атомному номеру к тому материалу, который подлежит контролю, но не приведен в таблицах.

При оценивании времени просвечивания на рентгенографические пленки, отличающиеся от пленок, для которых построены номограммы экспозиций, обычно используют коэффициенты перехода κ, корректирующие время просвечивания для различных вариантов зарядки кассет в соответствии с соотношением [32]: $t = t_0\kappa/\kappa_0$, где t_0 — время просвечивания, определенное по номограмме для заданной пленки и заданного варианта зарядки кассет; κ_0 — переходный коэффициент для заданной пленки и заданного варианта зарядки кассет; t — время просвечивания на другую пленку; κ — коэффициент, соответствующий типу пленки и варианту зарядки кассет, для которого определяется t.

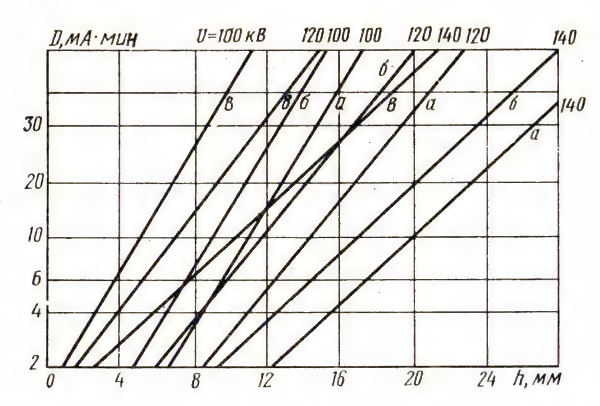


Рис. 4.32. Номограмма для определения экспозиции просвечивания сплавов на основе железа аппаратом РУП-150/300—10 с трубкой 0,3 БПВ6-150 на пленки РТ-1 (*а*), РТ-2 (*б*), РТ-5 (*в*) ($F = 750$ мм, оптическая плотность почернения снимка 1,5) с оловянисто-свинцовой фольгой толщиной 50 мкм; U — напряжение на рентгеновской трубке

Режимы просвечивания γ-излучением. Режимы просвечивания деталей, узлов и изделий из сплавов на основе железа, титана, алюминия и магния γ-излучением радиоактивных источников ^{170}Tm, ^{192}Ir, ^{37}Cs, ^{60}Co, ^{75}Se и ^{152}Eu определяют по номограммам типа приведенных на рис. 4.33 или универсальным номограммам, приведенным в справочной литературе, а источника — с помощью таблиц, например табл. 4.7.

При просвечивании с фокусными расстояниями, отличающимися от приводимых в номограммах, время просвечивания корректируется согласно соотношению $t = t_0F^2/F_0^2$, где t — искомое время при фокусном расстоянии F; t_0 — время просвечивания при фокусном расстоянии F_0, найденное по номограмме. Время просвечивания определяют как отношение найденного по номограмме значения экспозиции к мощности экспозиционной дозы источника в момент просвечивания. При определении времени просвечивания на рентгенографические пленки, отличающиеся от пленок, для которых построены номограммы экспозиций, можно пользоваться приведенными рекомендациями для рентгеновского излучения.

При просвечивании ОК из материалов, отличающихся по плотности от материалов, для которых имеются номограммы экспозиций, время просвечивания приближенно можно определить по этим номограммам с корректировкой

(пересчетом) толщины просвечиваемого ОК на эквивалентную толщину сплава, наиболее близкого по плотности к материалу ОК. Эквивалентная толщина определяется соотношением $h_{эк}=h_x\rho_x/\rho$, где $h_{эк}$ и ρ — соответственно эквивалентная толщина и плотность сплава, для которого построена номограмма; h_x и ρ — соответственно толщина и плотность материала ОК.

Режимы просвечивания тормозным излучением ускорителей электронов. Режимы просвечивания ОК с помощью высокоэнергетичных источников излучения определяются по номограммам (рис. 4.34), где по оси абсцисс отложена толщина ОК с указанием материала, а по оси ординат — экспозиционная доза (рентген) на расстоянии 1 м от мишени источника в отсутствие ОК, которая необходима для получения снимков с заданной оптической плотностью при заданном варианте зарядки кассет и фокусном расстоянии. Время просвечивания находят по отношению экспозиции (рентген) к мощности экспозиционной дозы на расстоянии 1 м, создаваемой источником.

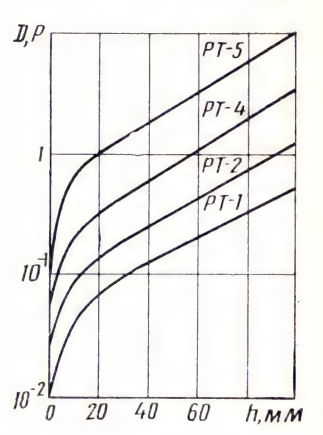


Рис. 4.33. Номограмма для определения экспозиций просвечивания сплавов на основе титана γ-излучением ^{170}Tm на пленки типа РТ-1, РТ-4 и РТ-5 со свинцовой фольгой толщиной 50 мкм ($F=500$ мм; оптическая плотность 1,5)

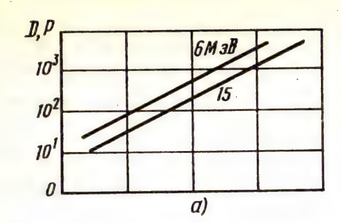
При просвечивании ОК, материал которых отличается от материала, для которого построена номограмма, время просвечивания приближенно можно оценить по этой номограмме с корректировкой толщины ОК на эквивалентную толщину материала, указанного в номограмме. Эквивалентная толщина ОК определяется по формуле (4.16). При этом линейные коэффициенты ослабления устанавливают по эффективной энергии излучения, определяемой соотношениями:

$$E_{эф}=\begin{cases} 2E/3 & \text{при } E\leqslant 1 \text{ МэВ}, \\ E/2 & \text{при } 1 \text{ МэВ}\leqslant E\leqslant 10 \text{ МэВ}, \\ E/3 & \text{при } E>10 \text{ МэВ}, \end{cases}$$

где E — энергия ускоренных электронов.

Химико-фотографическая обработка экспонированной рентгенографической пленки. После экспонирования пленку подвергают химико-фотографической обработке путем выполнения следующих операций: проявление, промежуточная промывка, фиксирование, окончательная промывка, сушка. Эти операции требуют соблюдения оптимальных условий их проведения [31].

Расшифровка снимков с оформлением полученных результатов. Расшифровывая информацию, заключенную в радиографи-



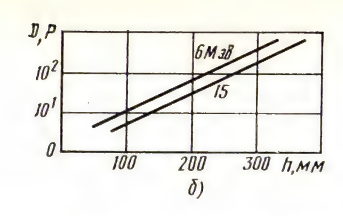


Рис. 4.34. Номограмма для определения экспозиций просвечивания сплавов на основе железа тормозным излучением бетатрона на различные энергии на пленку РТ-2 ($F=2$ м; оптическая плотность почернения 1,7) со свинцовым экраном (*а*) и с комбинированным экраном (свинцовым и флюоресцирующим) (*б*)

Таблица 4.9

Абсолютная чувствительность при контроле сварных соединений

Радиационная толщина ОК, мм	Класс чувствительности, мм		
	1	2	3
До 5	0,1	0,1	0,2
5 ... 9	0,2	0,2	0,3
9 ... 12	0,2	0,3	0,4
12 ... 20	0,3	0,4	0,5
20 ... 30	0,4	0,5	0,6
30 ... 40	0,5	0,6	0,75
40 ... 50	0,6	0,75	1,0
50 ... 70	0,75	1,0	1,25
70 ... 100	1,0	1,25	1,5

Таблица 4.10

Характерные размеры дефектов, выявляемых по радиографическим снимкам

Материал ОК и вид дефекта	Толщина материала ОК, мм		
	25	10	20
Сплавы на основе железа и титана			
Трещины и непровары с шириной раскрытия 0,025 мм	0,1	0,2	0,3
Неметаллические включения и включения вольфрама, газовые поры	0,25	0,3	0,5
Сплавы на основе алюминия и магния			
Трещины и непровары с шириной раскрытия 0,025 мм	0,2	0,3	0,4
Неметаллические включения, газовые поры	0,3	0,5	1,0

ческом снимке, наблюдатель оценивает качество ОК. Этот этап работы является наиболее ответственным. Следует отметить, что полностью реализовать высокие показатели современных радиографических систем в реальных условиях радиографического процесса, как правило, не удается. Поэтому, прежде чем приступить к расшифровке радиографического снимка, необходимо быть уверенным в его достаточно высоком качестве.

При просмотре и расшифровке снимков используют негатоскопы — специальные устройства для просмотра снимков, состоящие из осветителя большой мощности, матового экрана, диффузно рассеивающего свет, регулятора яркости, шторок для ограничения размеров поля просмотра. Максимальная яркость освещенного поля должна составлять не менее 10^{s+2} кд/м², где s — оптическая плотность снимка. Размеры освещенного поля должны регулироваться при помощи подвижных шторок или экранов-масок в таких пределах, чтобы освещенное поле полностью перекрывало снимок.

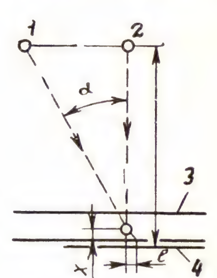


Рис. 4.35. Схема просвечивания для определения глубины залегания различимого на снимке дефекта:
1, 2 — источник излучения; 3 — ОК; 4 — рентгеновская пленка

Снимки, допущенные к расшифровке, не должны иметь пятен, полос, загрязнений и повреждений эмульсионного слоя, на них должны быть отчетливо видны изображения ограничительных меток, маскировочных знаков и эталонов чувствительности. Оптическая плотность изображений контролируемых участков и эталонов чувствительности должна быть не менее 1,5. Абсолютная чувствительность контроля (наименьший диаметр выявляемой на снимке проволоки проволочного эталона, наименьшая глубина выявляемой на снимке канавки канавочного эталона, наименьшая толщина пластинчатого эталона, при которой на снимке выявляется отверстие с диаметром, равным удвоенной толщине эталона) должна соответствовать требованиям технической документации на ОК, в которых даются максимальные значения указанных параметров эталонов. Так, согласно ГОСТ 7512—82 при контроле сварных соединений абсолютная чувствительность контроля не должна превышать значений, приведенных в табл. 4.9.

Требованиями технической документации на ОК может быть задана также относительная чувствительность контроля κ в процентах: $\kappa\ (\%) = 100\delta/h$, где δ — абсолютная чувствительность контроля; h — радиационная толщина ОК.

Расшифровывают радиографические снимки в затемненном помещении или в экранированной от воздействия прямого света части помещения. При изменении освещенности зрительная си-

стема человека в течение некоторого времени приспосабливается к новым условиям освещения. Чувствительность глаза обычно восстанавливается только после 10 мин при переходе от воздействия солнечного света и 0,5 мин от воздействия обычного искусственного света.

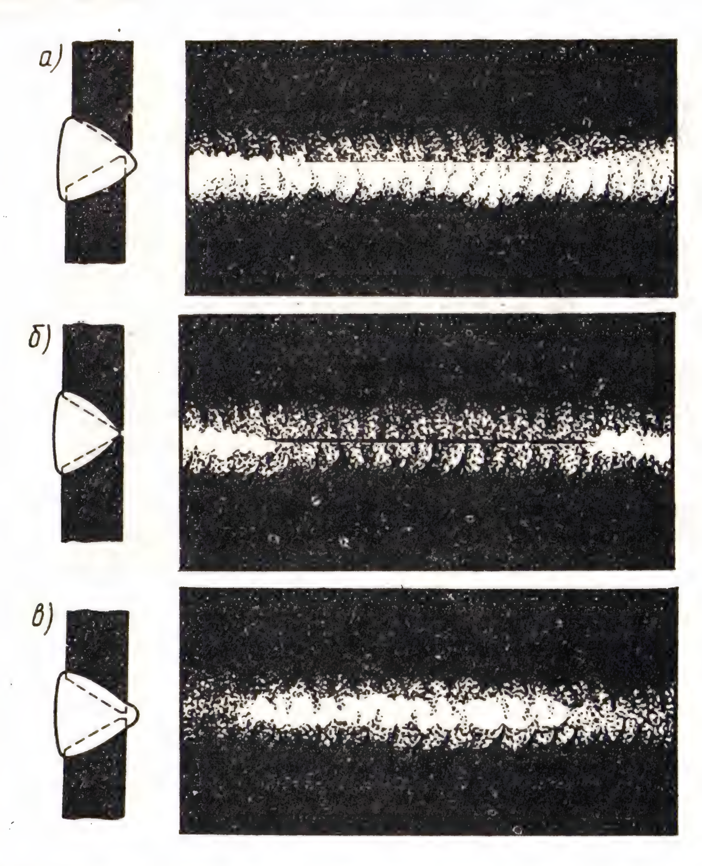


Рис. 4.36. Схема и рентгеновский снимок сварного шва со смещением стыкуемых кромок и непроваром по кромке (*а*), с непроваром в корне (*б*) и чрезмерным проваром (*в*)

При расшифровке снимков определяют вид выявленных дефектов и оценивают их размеры. При измерении дефектов размером до 1,5 мм обычно применяют зрительную лупу с ценой деления 0,1 мм, свыше 1,5 мм — любое измерительное устройство с ценой деления 1 мм.

Характерные размеры дефектов, выявляемых по радиографическим снимкам, зависят от типа дефекта, толщины и материала ОК (табл. 4.10).

Чтобы устранить дефект в ОК или оценить его влияние на работоспособность конструкции, необходимо прежде всего определить местоположение дефекта (глубину его залегания). Часто сам характер дефекта указывает на его местонахождение в ОК. Так, при неполном проплавлении кромок в сварном шве с V-образной разделкой (непровар) его можно видеть со стороны

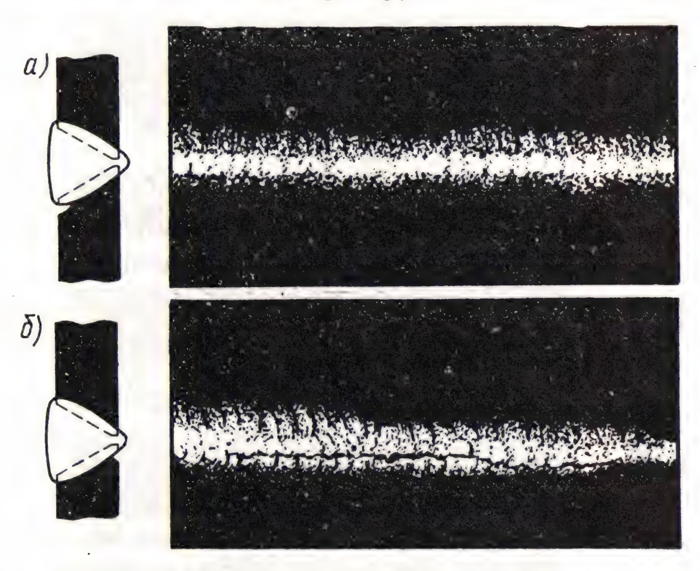


Рис. 4.37. Схема и рентгеновский снимок сварного шва с подрезом (*а*) и надрезом (*б*)

корня шва. Усталостные трещины, как правило, возникают на поверхности ОК. При определении глубины залегания внутренних дефектов обычно используют метод получения двойного изображения, или стереорадиографию. При использовании метода двойного изображения одна экспозиция производится пучком, ось которого перпендикулярна поверхности ОК, а другая под углом $\alpha = \operatorname{arctg}(L/F)$, где $L/F = 0{,}2...0{,}5$ (рис. 4.35) на ту же пленку. Каждая экспозиция составляет 0,5 от полной экспозиции, требуемой для просвечивания ОК. По значениям F и l определяют глубину залегания дефекта $x = Fl/(F+l)$.

При использовании стереорадиографии получают два снимка одного и того же участка ОК путем просвечивания его источником из двух позиций, отстоящих на расстоянии 35...50 мм вправо и влево от нормали к поверхности ОК. Затем снимки рассматривают через стереоскоп.

Результаты расшифровки снимков и чувствительность контроля регистрируются в специальном журнале. Для сокращения записи об обнаруженных на снимках дефектах пользуются со-

кращенными обозначениями, регламентированными нормативными документами.

Приведем описание некоторых дефектов сварных соединений, которые могут быть обнаружены радиографическим методом. На

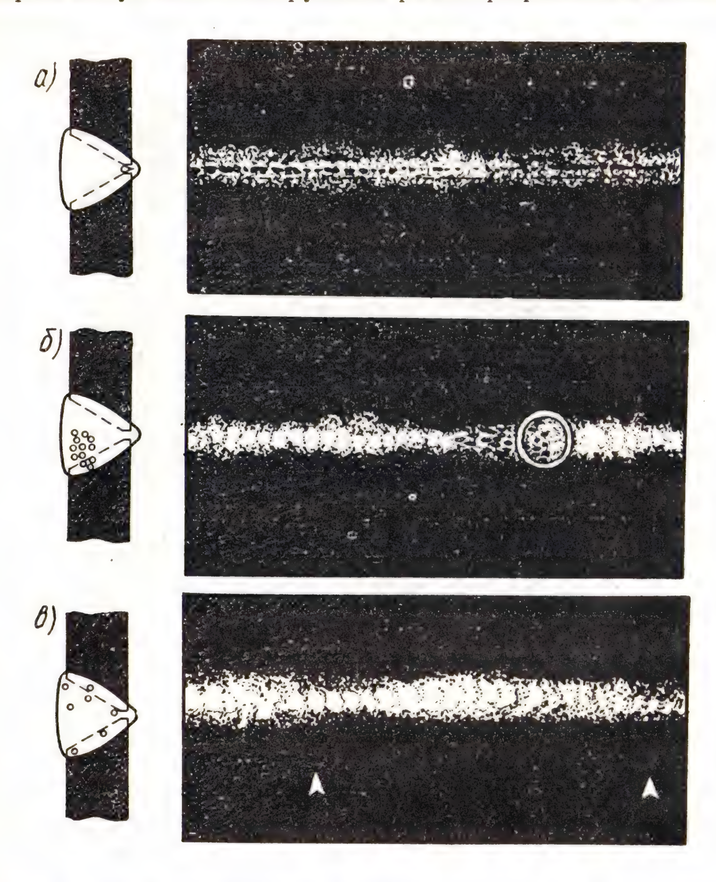


Рис. 4.38. Схема и рентгеновский снимок сварного шва с цепочками пор и прерывистым непроваром (*а*), группой пор (*б*), пористостью (*в*)

рис. 4.36 представлен снимок сварного шва со смещением стыкуемых кромок и непроваром по кромке (*а*), с непроваром в корне (*б*) и чрезмерным проваром (*в*). Непровары обнаруживаются при загрязнении кромок, неправильной их подготовке, смещениях или неустойчивом режиме сварки. Они снижают работоспособность соединения из-за ослабления рабочего сечения шва, и кроме того, острые непровары могут создать концентрацию напряжения в шве. Чрезмерный провар — следствие чрезвычайно высокой погонной энергии при сварке, неравномерной скорости сварки и т. п.

Подрезы (рис. 4.37, *а, б*) представляют углубления в основном металле, расположенные по краям шва. Они образуются при сварке на повышенных токах и напряжениях дуги. Подрезы уменьшают рабочее сечение, вызывают концентрацию напряжений и могут стать причиной разрушения шва из-за появления

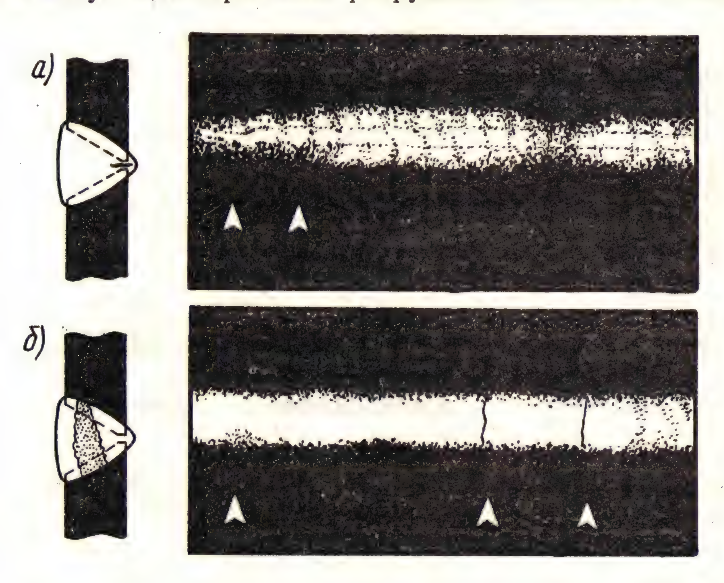


Рис. 4.39. Схема и рентгеновский снимок сварного шва с продольной (*а*) и поперечной (*б*) трещинами



Рис. 4.40. Схема и рентгеновский снимок сварного шва с вольфрамовыми включениями

трещин у края подреза. Цепочки пор, группа пор и рассеянная пористость (рис. 4.38, *а—в*) образуются при насыщении сварочной ванны газами вследствие загрязнения кромок, влажности обмазки и флюсов, вредных примесей и т. п. Они снижают прочность и плотность шва. Самыми опасными дефектами сварки

считаются трещины (рис. 4.39, *а*, *б*). Металлические включения имеют место при аргонодуговой сварке неплавящимися электродами и обычно состоят из частичек вольфрама (рис. 4.40).

4.4.3. Электрорадиография

Электрорентгенографический процесс состоит из следующих операций (рис. 4.41):

зарядка электрорентгенографического слоя;

экспонирование, проявление скрытого электростатического изображения;

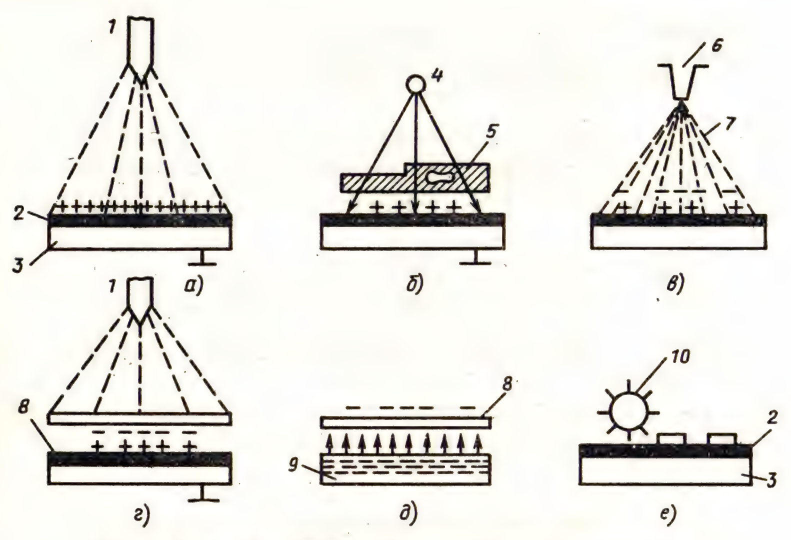


Рис. 4.41. Схема электрорентгенографического процесса:

а — зарядка пластины; *б* — экспонирование ОК; *в* — проявление скрытого электростатического изображения; *г* — перенос порошкового изображения на бумагу; *д* — закрепление; *е* — очистка полупроводникового слоя от остатков проявителя; *1* — коронирующий электрод; *2* — селеновый слой; *3* — подложка; *4* — источник излучения; *5* — ОК с дефектом; *6* — бункер с проявляющим порошком; *7* — проявляющее облако; *8* — бумага; *9* — ванна с растворителем, *10* — очищающая щетка

перенос порошкового изображения на бумагу, закрепление и очистка полупроводникового слоя от остатков проявителя.

Зарядка — это процесс нанесения электростатических зарядов на поверхность полупроводникового слоя. Наиболее эффективна электризация в поле коронного разряда, в процессе которого ионы осаждаются на полупроводниковый слой, служащий барьером на пути их движения. Электрическое поле, создаваемое осажденными зарядами, препятствует их дальнейшему осаждению вследствие действия электрических сил отталкивания. Начальный потенциал, до которого можно зарядить пластину, возрастает с увеличением времени зарядки, разности потен-

циалов между коронирующим электродом и подложкой и толщины полупроводникового слоя. Оптимальный потенциал составляет 800...1200 В. Параметры и качество электрорентгенографических снимков зависят от равномерности распределения начального потенциала по поверхности пластины.

Экспонирование. В процессе просвечивания прошедшее через ОК излучение создает на пластине скрытое электростатическое изображение. Режимы просвечивания определяются, как и при использовании пленок, по графикам с учетом паспортной чувствительности к излучению используемых пластин и области применения электрорадиографического метода (табл. 4.11).

Таблица 4.11

Режимы просвечивания при использовании электрорадиографии

Толщина ОК, мм, из сплава на основе				Напряжение на трубке, кВ, не более
железа	титана	алюминия	магния	
0,2	0,6	4	7	40
0,4	1,5	6	9	50
2	6	15	27	80
11	26	52	82	150
25	52	113	165	250

Проявление — это процесс, заключающийся в отложении заряженных частиц порошкообразного проявителя (тонера) на поверхности полупроводникового слоя в соответствии с распределением на нем электрических зарядов. Электростатические изображения проявляют различными методами: каскадным, магнитной кистью, жидкостным и пылевым облаком. Каскадный метод основан на трибоэлектрическом эффекте — контактной электризации двух соприкасающихся тел. В электрорентгенографии для проявления полутоновых изображений наиболее часто применяют метод пылевого облака: заряженное облако тонкодисперсного (размером $10^{-7}...10^{-5}$ мм) проявителя с помощью специального устройства подается к полупроводниковому слою и оседает на нем в соответствии с распределением потенциала скрытого электростатического изображения. Электризацию проявителя удобнее всего осуществлять, поместив на пути порошкообразного облака электрод, который находится под высоким напряжением (около 12 кВ). Продолжительность проявления 30...40 с.

Перенос порошкового изображения на бумагу проводят электростатическим контактным способом. На проявленный слой пластины накладывают лист бумаги и заряжают его с помощью коронного разрядника зарядом, знак которого противоположен знаку проявляющих частиц. Под действием электростатических

сил бумага прижимается к поверхности пластины, а частицы проявителя отрываются от селенового слоя и приходят на поверхность бумаги.

Закрепление. Порошковое изображение, полученное сухим методом проявления, легко разрушается даже при незначительном механическом воздействии. В практике используют три основных метода закрепления таких изображений: давлением, термическое и закрепление парами активного растворителя. Наиболее часто используют последний метод. В этом случае лист бумаги с порошковым изображением размещают в рамку, которая находится над органическим растворителем. В насыщенных парах последнего частицы проявителя, в состав которого входят и смолы, размягчаются, под действием капиллярных сил проникают в поры бумаги и в дальнейшем изображение сохраняется.

Очистка. Перед повторным использованием пластина очищается от остатков проявителя с помощью марлевых тампонов, байки, замши либо вращающимися щетками, валиками, чтобы при последующих съемках не увеличивалась вуаль на изображении. Такая очистка приводит к тому, что после длительной эксплуатации пластина покрывается тонким слоем проявителя. Для удаления этого слоя пластины промывают в изопропиловом или этиловом спирте.

Для электрорентгенографии характерна возможность получения изображения мелких дефектов с высоким контрастом из-за подавления низких пространственных частот в процессе получения снимков. Следует отметить, что при электростатическом переносе порошкового изображения на бумагу его разрешающая способность снижается примерно с 20 лин./мм до 8—12 лин./мм, т. е. в 1,5...2 раза.

Не рекомендуется хранить снимки на солнечном свету, так как бумага под действием ультрафиолетового излучения желтеет и теряет белизну.

В настоящее время выпускаются и широко используются электрорентгенографические установки типа ЭРГА-03, РИ-20ЭРГ, которые позволяют осуществлять зарядку электрорентгенографических слоев до 800...1600 В, время зарядки 15...18 с, потенциал проявления изображения 4...8 кВ, время опыления слоя порошком 10...15 с, время подзарядки порошкового снимка 5...10 с.

Промышленностью выпускаются пластины типа ПЭР2-3П с чувствительностью 150 $Р^{-1}$, представляющие алюминиевую полированную проводящую подложку с нанесенным на нее с одной стороны слоем аморфного селена. Пластины типа ПЭР4-3П отличаются от пластин ПЭР2-3П тем, что между подложкой и селеновым слоем находится слой свинца толщиной 0,2...0,4 мм. Этот слой выполняет функции переднего усиливающего экрана, если экспонирование проводится со стороны подложки, и задне-

го — при экспонировании со стороны селенового слоя. В последнем случае чувствительность пластины при облучении рентгеновским излучением с энергией 100 кэВ составляет 200...240 $Р^{-1}$.

4.4.4. Нейтронная радиография

На рис. 4.42 приведена схема формирования пучка медленных нейтронов при радиографии изделия *5*. Из зоны замедлителя *2* (на расстоянии 2...3 см от источника быстрых нейтронов *1*) выводится пучок медленных нейтронов по пустотелому каналу конической формы *4*. Нерезкость изображения, вызванная конечными размерами фокусного пятна (f) источника медленных нейтронов, можно оценить по формуле $U = f(F-H)/H$, а плотность потока нейтронов в районе детектора — выражением $\varphi_n \sim f^2/F^2$, где «$\sim$» — знак пропорциональности. Из этих соотношений следует, что уменьшение размеров фокусного пятна позволяет уменьшить нерезкость изображения, однако при этом резко снижается плотность потока нейтронов в зоне детектора *6* и, следовательно, производительность контроля. В качестве детектора в нейтронной радиографии обычно используют рентгеновскую или фототехническую пленку *7* совместно с экранами *8*, конвертирующими нейтронное изображение в гамма-, бета-, альфа- или световые изображения, к которым фотоматериалы чувствительны.

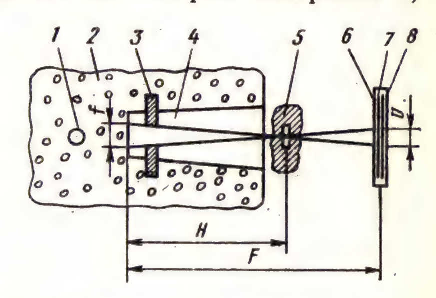


Рис. 4.42. Схема формирования пучка медленных нейтронов для радиографии ОК:

1 — источник быстрых нейтронов, *2* — замедлитель; *3* — диафрагма нейтронного пучка; *4* — канал для выведения нейтронного пучка; *5* — ОК; *6* — детектор нейтронного изображения; *7* — фотоматериал; *8* — экран

Для получения светового изображения используют два метода: прямой экспозиции и переноса. В *методе прямой экспозиции* рентгеновская пленка, установленная в кассете, находится в контакте с экраном-преобразователем. После окончания экспозиции пленка проявляется, и изображение анализируется человеком. В *методе переноса* используют экран-преобразователь из материала, который активизируется в нейтронном пучке (например, индий или диспрозий) и становится источником ионизирующего излучения, причем локальная активность экрана пропорциональна воздействующему нейтронному потоку. После окончания экспозиции в нейтронном пучке экран приводится в контакт с фотоматериалом и на него переносится изображение.

В методе переноса исключается влияние на снимок γ-излучения, возникающего в нейтронном канале и от контролируемого вещества.

При получении светового изображения методом прямой экспозиции в качестве эффективного средства используется экран из гадолиния, располагаемый за фоточувствительным слоем пленки относительно нейтронного пучка. Захватив нейтрон, нуклид ^{155}Gd или ^{157}Gd за короткое время испускает электроны с энергией 80 и 180 кэВ, γ-кванты с энергией от 80 кэВ и более. При этом основной вклад в поглощенную эмульсией пленки энергию дают электроны, под действием которых и происходит экспонирование пленки. Оптимальная толщина гадолиниевого экрана до 10 мкм.

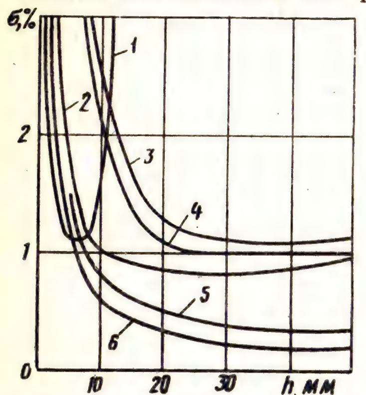


Рис. 4.43. Графики зависимости чувствительности контроля для объектов, выполненных из различных материалов, от их толщины:

1 — оргстекло; *2* — сталь; *3* — свинец; *4* — графит; *5* — уран; *6* — вольфрам

В методе переноса, например с помощью диспрозия ^{164}Dy, поглощенный его ядром нейтрон образует радиоактивный нуклид ^{165}Dy, который с периодом полураспада 140 мин испускает β-излучение, которое является основным фактором, влияющим на формируемое изображение на фотоматериале. Оптимальная толщина пластины из диспрозия 150 ... 200 мкм.

В устройствах с радионуклидными источниками при малой плотности потока нейтронов используют детекторы с люминесцентными экранами-преобразователями, которые могут содержать кристаллы сернистого цинка, активированные серебром, с напылением фтористого лития (^6Li). В результате взаимодействия нейтронов с ^6Li образуется нестабильное ядро ^7Li, испускающее α-частицу, которая возбуждает кристалл Zn(Ag)S. Возбужденный кристалл испускает световое излучение, экспонирующее рентгеновскую пленку. Люминесцентные экраны имеют значительную собственную нерезкость, составляющую 0,3... 0,4 мм, в то время как нерезкость гадолиниевых экранов 0,45 мм, диспрозиевых 0,2 ... 0,3 мм.

Люминесцентные экраны в сочетании с телевизионной техникой позволяют визуализировать изображения непосредственно в процессе просвечивания объектов нейтронами.

Экспериментальные данные по чувствительности нейтронной радиографии приведены на рис. 4.43. В водородсодержащих изделиях — оргстекло, эбонит, дерево, гетинакс, полиэтилен — можно выявить изменения толщины, вызванные дефектами разме-

ром 0,1...0,2 мм при толщине изделий до 8 мм. Используя метод нейтронной радиографии, можно выявить корродирование алюминиевых деталей, размещенных внутри металлических корпусов. В этом случае основной вклад в ослабление нейтронного пучка вносит соединение Al(OH), возникающее в результате коррозии. При контроле клеевых соединений (клей на основе органических веществ) можно выявлять пленки клея толщиной до 0,1 мм.

Приведенные на рис. 4.43 данные показывают, что для вольфрама и урана порог чувствительности составляет примерно 0,5%, для графита, свинца и стали до 1%. Следует заметить, что рассматриваемый здесь метод контроля требует специализированных источников излучения, автоматизации и механизации процессов контроля, позволяющих дистанционно управлять доставкой деталей и детекторов в зону просвечивания и выводом из нее. Кроме того, должны быть обеспечены условия безопасной работы обслуживающего персонала.

Как и при других видах радиографии, процесс нейтронной радиографии можно разделить на ряд этапов: подготовительный, просвечивание ОК, фотообработка экспонированного фотоматериала и расшифровка снимка.

Время экспозиции $t_э = F_n/(\varphi_0 g(x))$, где F_n — перенос нейтронов, нейтрон/см^2, при воздействии которых на детектор достигается требуемая оптическая плотность почернения пленки; φ_0 — плотность потока нейтронов перед ОК; $g(x)$ — коэффициент пропускания плотности потока нейтронов контролируемым материалом толщиной x.

Остальные этапы нейтронной радиографии не отличаются от соответствующих этапов радиографии с использованием рентгеновского излучения.

Задачи и контрольные вопросы

4.4.1. На рентгеновском аппарате, для которого на рис. 4.34 построена номограмма, при фокусном расстоянии 75 см просвечивают сварной шов стальной детали с толщиной стенки 5 мм на пленку РТ-5, помещенную между двумя слоями оловянно-свинцовой фольги толщиной 0,05 мм. Определить режимы просвечивания.

Решение

В соответствии с табл. 4.4 при просвечивании сплавов на основе железа толщиной 5 мм напряжение на рентгеновской трубке не должно быть выше 100 кВ. Из номограммы рис. 4.32 следует, что при просвечивании стали толщиной 5 мм при напряжении 100 кВ требуется экспозиция 10 мА·мин. В соответствии со справочными данными [32], максимальный анодный ток трубки 0,3 БПВ6-150 аппарата РУП-150/300-10 составляет 2 мА. При токе 2 мА время просвечивания $t = 10$ мА·мин/2 мА $= 5$ мин.

4.2.2. Требуется проконтролировать ОК из меди толщиной $h = 8$ мм на рентгенографическую пленку РТ-5 при фокусном расстоянии 750 мм. Определить режимы просвечивания.

Решение

Для меди $Z=29$, ближайший по атомному номеру материал согласно табл. 4.4 — железо ($Z=26$).

Используя в дальнейшем данные номограммы рис. 4.32, контроль будем проводить ориентировочно при напряжении на рентгеновской трубке 140 кВ с использованием оловянно-свинцовой фольги толщиной 0,05 мм. Для определения эквивалентной толщины железа рассчитаем отношение линейных коэффициентов для железа и меди при напряжении на рентгеновской трубке 140 кВ, используя справочные данные [32]:

$$\frac{\mu}{\mu_т} = \frac{(\mu/\rho)_{Cu}\rho_{Cu}}{(\mu/\rho)_{Fe}\rho_{Fe}} = \frac{0{,}61\ см^2/2 \cdot 8{,}94\ г/см^2}{0{,}5\ см^2/2 \cdot 7{,}87\ г/см^3} = 1{,}4.$$

Следовательно, эквивалентная толщина железа $h_т=8$ мм$\times 1{,}4 \approx 11$ мм.

В соответствии с номограмомй рис. 4.32 при просвечивании сплавов на основе железа при напряжении на трубке 140 кВ необходима экспозиция 12 мА·мин. При токе 2 мА время просвечивания $t=12$ мА·мин/2 мА$=6$ мин.

4.4.3. Определить время просвечивания того же, что и в предыдущей задаче, ОК, при тех же условиях, но на пленку РТ-4М с металлическими усиливающими экранами.

Решение

Время просвечивания на пленку РТ-5 с металлическими усиливающими экранами, найденное по номограмме (рис. 4.33), $t_0=6$ мин необходимо умножить на коэффициент перехода $\kappa=2{,}5$ и разделить на $\kappa_0=4{,}2$:

$$t = t_0\kappa/\kappa_0 = 6 \cdot 2{,}5/4{,}2 = 3{,}6\ мин.$$

4.4.4. Изделие из титанового сплава толщиной 10 мм просвечивается за одну экспозицию γ-излучением ^{170}Tm с мощностью экспозиционной дозы $P_0 = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ Р/с на пленку РТ-1 со свинцовой фольгой толщиной 0,05/0,05 мм. Определить время просвечивания.

Решение

Используя номограмму рис. 4.33, находим, что при $F_0=500$ мм для титанового сплава толщиной 10 мм $D_0=0{,}035$ Р. Тогда $t=D_0/P_0=0{,}035P/1{,}1 \times 10^{-4}$ Р/с$=320$ с.

4.4.5. Какие из указанных дефектов ОК — трещины, рыхлоты, нарушения магнитных свойств — позволяет выявлять радиография?

4.4.6. Какие факторы определяют тип используемой рентгеновской пленки при просвечивании конкретного ОК?

4.4.7. Где устанавливаются эталоны чувствительности при просвечивании ОК?

4.4.8. Снимок хорошего качества получен при заданных условиях экспонирования пленки со временем экспозиции 10 мин и токе трубки 5 мА, ток трубки увеличен до 10 мА. Каково должно быть время экспозиции, если остальные условия экспонирования остаются неизменными?

4.4.9. При радиоскопическом контроле на каждый сигнальный рентгеновский фотон с энергией $E=100$ кэВ оператору должен передаваться сигнал, сформированный группой $n=5$ фотонов со средней энергией каждого $\varepsilon=2$ эВ. Квантовый выход сетчатки глаза $Q_D=0{,}05$ и при оптимальных условиях наблюдения светотеневой картины, возникающей на выходе радиационно-оптического преобразователя и попадающих на глаз, составляет менее $0{,}001\eta$. Обосновать необходимость энергетического усиления сигнала в информационном канале радиационного интроскопа.

Решение

Чтобы глаз в среднем фиксировал поступление на входной экран интроскопа каждый сигнальный рентгеновский фотон, необходим выход в полупространство наблюдения с выходного экрана группы из $N=n/(Q_D\eta)=5/(0{,}001\cdot0{,}05)=1\cdot10^5$ фотонов с энергией $E=N\varepsilon=200$ кэВ. Поскольку $E_1=100$ кэВ$<E=200$ кэВ, необходимо энергетическое усиление сигнала в информационном тракте интроскопа.

4.4.10. Предполагая, что время «суммирования» глаза τ составляет 0,2 с, и используя данные табл. 5.1 [29], оценить минимальные размеры пор, которые можно выявить в ОК из железа толщиной 40 мм.

Решение

По данным табл. 51 [29] число сигнальных фотонов рентгеновского излучения, поступающих на площадку 1 мм² за 1 с, составляет $\bar{N}=3000$ 1/(мм²·с). Средний шумовой контраст на площадке размером ε^2 за время τ определяется формулой

$$C_N=\sqrt{N\varepsilon^2\tau}/(N\varepsilon^2\tau)=1/(\varepsilon\sqrt{N\tau}).$$

Сигнальный контраст, обусловленный наличием поры в ОК размером ε без учета вклада рассеянного излучения, $C=\varepsilon\mu$, где $\mu=0{,}97$ 1/см — коэффициент линейного ослабления первичного излучения материалом ОК.

Чтобы пора с контрастом C выделялась на флюктуирующем фоне со средним контрастом C_N, необходимо выполнить условие $C\geqslant\kappa C_N$, где $\kappa=3$, и, следовательно, $\varepsilon\mu\geqslant\kappa/(\varepsilon\sqrt{N\tau})$ или $\varepsilon\geqslant\sqrt{\kappa/(\mu\sqrt{N\tau})}\approx3\cdot10$ мм²/25$\approx1{,}1$ мм.

4.4.11. Оценить объем V_g дефектов, которые можно выявить в алюминиевом ОК с помощью радиометрического дефектоскопа, работающего в токовом режиме при мощности дозы излучения в зоне преобразователя 400 мкР/с, его квантовой эффективности $Q_D=0{,}8$, энергии рентгеновских фотонов $E=100$ кэВ, размере коллиматора $b=4$ мм, скорости контроля $v=125$ мм/с.

Решение

Для токовых схем регистрации

$$V_g\geqslant\frac{K}{0{,}9\mu}\sqrt{\frac{A_к}{\nu_0}}\sqrt{П},$$

где $\nu_0=Q_D\varphi_n A_к$; $П=bv$; φ_n — плотность потока рентгеновских квантов в районе преобразователя; μ — коэффициент линейного ослабления рентгеновских фотонов материалом ОК. Для фотонов с энергией $E=100$ кэВ, для ОК из алюминия $\mu=0{,}5$ см$^{-1}$, а мощность дозы излучения 400 мкР/с соответствует 8×10^4 фотонов/(мм²·с).

При $K=3$

$$V_g\geqslant\frac{30}{0{,}9\cdot0{,}5}\sqrt{\frac{4\cdot125}{0{,}8\cdot10^4}}\approx8\text{ мм}^3.$$

4.4.12. При измерениях на ОК в виде стальной полосы толщиной $h=3{,}5$ мм оценить энергию фотонов рентгеновского излучения.

Решение

Поток энергии рентгеновских фотонов за полосой пропорционален $\Phi=\Phi_0e^{-\mu h}$, где Φ_0 — поток энергии рентгеновских фотонов перед полосой; μ —

линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения материалом полосы.

При изменении толщины полосы на $dh \ll h$ сигнал пропорционален $d\Phi = \mu\Phi_0 e^{-\mu h} dh$.

Если используется мощный источник излучения, то статистической погрешностью можно пренебречь по сравнению с аппаратной σ_a, а последняя обратно пропорциональна сигналу $d\Phi : \sigma_a \sim e^{\mu h} dh/\mu\Phi_0$ и достигает минимума при $\mu h = 1 : \mu = 1/h \approx 3$ см$^{-1}$. Такое значение μ для стальной полосы соответствует энергии рентгеновских фотонов $E \approx 90 \dots 100$ кэВ.

При малой аппаратурной погрешности по сравнению со статистической отношение сигнал/шум

$$q \sim \frac{\mu\Phi_0 e^{-\mu h} dh}{\sqrt{\Phi_0 e^{-\mu h}}} \approx \mu e^{-0.5\mu h} \sqrt{\Phi_0} dh.$$

Максимум этого отношения достигается при $\mu h = 2$, что соответствует энергии рентгеновских фотонов $E \approx 60 \dots 70$ кэВ.

§ 4.5. РАДИОСКОПИЯ

4.5.1. Особенности и основные характеристики радиоскопических систем

Рентгенография имеет много достоинств, однако ее применение в некоторых случаях ограничивается тем, что требуется значительное время на обработку и расшифровку рентгенограмм. Часто высокие темпы современного производства требуют экспресс-контроля, и в этом случае вместо рентгенографии используют *метод радиационной интроскопии (радиоскопии)*, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем получаемое изображение анализируется в процессе контроля.

Главное достоинство радиоскопии заключается в том, что световое изображение на выходном экране становится достаточно хорошим, как только плотность потока энергии квантов радиационного изображения достигнет определенного значения. Качество светотеневого изображения просвечиваемого объекта зависит от характеристик излучения и характеристик радиационно-оптического преобразователя, причем при радиоскопии значения некоторых характеристик (плотность потока энергии излучения, его спектральный состав, коэффициент усиления яркости преобразователя, его коэффициент передачи контраста и пр.) можно изменять в процессе анализа светового изображения (см. п. 4.3.6). Лучшее качество изображения можно получить, не зная оптимальных значений параметров радиационного интроскопа и не прибегая ни к каким расчетам.

Метод позволяет оператору увеличить геометрические размеры светового изображения объекта, перемещая объект от вход-

ного экрана преобразователя в направлении высокоэнергетического источника, или повернуть и сместить объект, чтобы подобрать оптимальный угол падения излучения на объект. (В рентгенографии этим почти никогда не пользуются.) Если облучаемый образец неоднороден по плотности или имеет значительные изменения радиационной толщины и трудно анализировать отдельные детали световой картины, можно использовать подвижные фильтры, позволяющие локально уменьшить плотность потока энергии излучения, взаимодействующего с преобразователем. Можно также сначала облучать объект фотонами низкой энергии, что позволяет изучать области объекта слабого поглощения, а затем увеличить энергию, чтобы последовательно наблюдать область более высокого поглощения. Этот метод позволяет выявить и определить характер дефектов как неподвижных, так и находящихся в движении объектов.

В настоящее время в состав радиационно-оптических преобразователей кроме оптических и телевизионных устройств обычно входят цифровые устройства. Комбинация оптических, телевизионных и цифровых устройств позволяет наиболее полно использовать резервы улучшения основных характеристик интроскопов по сравнению с оптическими, электронными и цифровыми системами, применяемыми отдельно. С помощью оптических устройств можно осуществлять низкочастотную фильтрацию для подавления шума и исключения мелких текстур в световом изображении. Телевизионная техника позволяет осуществлять нелинейные преобразования электрических сигналов и изменять их полярность, высокочастотную фильтрацию и т. п. С помощью цифровых устройств, выполняющих множество простых операций и используемых как память, можно корректировать аналоговые системы, а также изменять яркость светового изображения при различной экспозиции. Специальным выбором характера указанной зависимости могут быть выделены определенные участки ОК со сложным профилем радиационной толщины в световой картине, и их структура может быть представлена с высокой контрастностью.

Одним из важных для практического применения свойством комбинированных систем радиационной интроскопии является почти неограниченная возможность «суммирования» изображений, что позволяет использовать радиоактивные источники, в том числе и нейтронные. Во многих случаях радиоскопия предпочтительна и с точки зрения техники безопасности, так как выходной экран преобразователя может быть расположен на значительном расстоянии от источника.

Радиационно-оптические преобразователи изображения, предназначенные для преобразования радиационного изображения в световое, имеют огромное разнообразие типов приборов, различный состав и технологию изготовления. Так, уже существующие

и разрабатываемые преобразователи основываются на рентгенолюминесценции, электрических и тепловых эффектах в жидких кристаллах, электрооптических эффектах в монокристаллах и керамических материалах, вторичной эмиссии, генерировании света в твердых телах в результате электронной бомбардировки, инжекции носителей под влиянием электрических полей и т. п.

В настоящее время в радиационной интроскопии широко распространены три схемы организации сбора информации: с использованием широкого (рис. 4.44), веерного (рис. 4.45) и игольчатого (рис. 4.46) пучков.

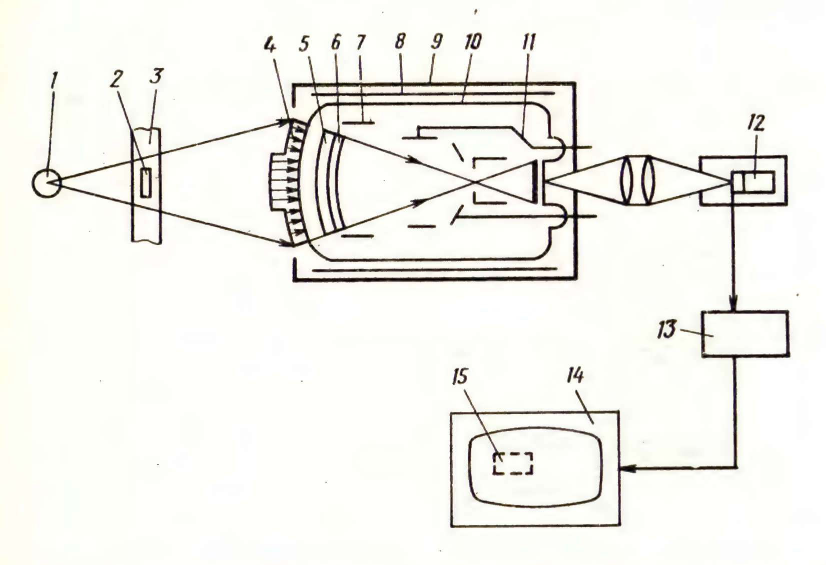


Рис. 4.44. Структурная схема рентгенотелевизионного интроскопа с рентгеновским электронно-оптическим преобразователем:

1 — источник излучения; *2* — ОК; *3* — дефект; *4* — радиационное изображение дефекта; *5* — входной экран; *6* — фотокатод; *7* — электроды; *8* — магнитный экран; *9* — защитный экран; *10* — колба; *11* — выходной экран; *12* — передающая телевизионная камера; *13* — телевизионный канал; *14* — видеоконтрольное устройство; *15* — изображение дефекта

Преимущества *схем с широким пучком:*

потенциальное число пространственных элементов, в которых излучение может регистрироваться независимо и одновременно, по порядку величины превышает 10^6;

радиационно-оптические преобразователи, используемые в таких системах, оптически связаны с телевизионными системами и изготовляются по отработанной технологии;

многообразие решаемых задач — контроль как неподвижных, так и подвижных объектов.

Преимущества *схем с веерным пучком:*

отсечка рассеянного излучения;

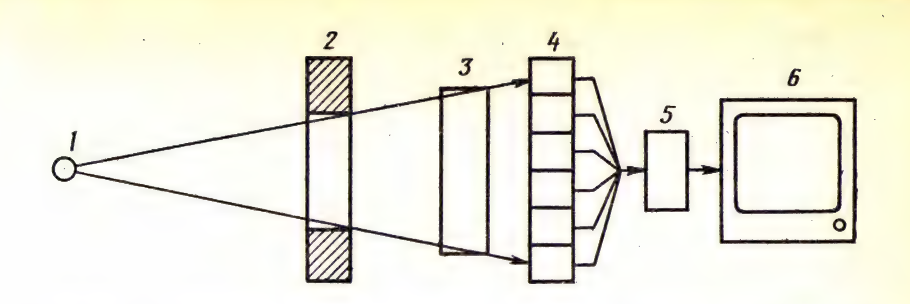


Рис. 4.45. Структурная схема интроскопа с веерным пучком рентгеновского излучения:

1 — источник излучения; *2* — щелевая диафрагма; *3* — подвижный ОК; *4* — линейка дискретных детекторов; *5* — АЦП; *6* — видеоконтрольное устройство

Рис. 4.46. Схема расположения блоков интроскопа с игольчатым сканирующим пучком:

1 — источник излучения; *2, 3* — видеоконтрольные устройства, информационно связанные соответственно с детекторами *6* и *9*; *4* — неподвижная щелевая диафрагма; *5* — вращающаяся щелевая диафрагма; *6* — детекторы рассеянного объектом излучения; *7* — рассеянное излучение; *8* — ОК; *9* — детектор прошедшего объект излучения; *10* — первичный игольчатый пучок; *11* — транспортер

датчики, используемые в таких системах, имеют большой динамический диапазон — более 1 : 1000 и большое отношение сигнал/шум (более 60 дБ), поэтому в большинстве случаев не требуется использовать дополнительные компенсаторы для динамического подавления сигналов;

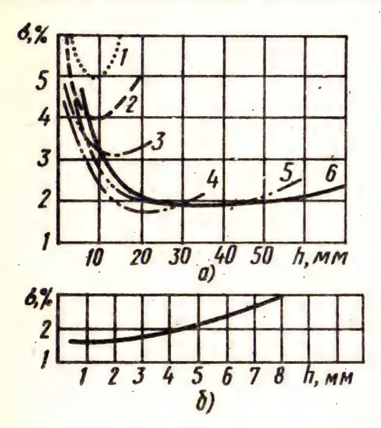


Рис. 4.47. Относительная чувствительность σ радиационного контроля стальных изделий по проволочному эталону:

а — расстояние фокусное пятно — входной экран 500 мм; расстояние объект — входной экран 250 мм с рентгеновским излучателем на напряжение до 160 кВ и фокусным пятном 0,4×0,4 мм (кривые *1 ... 4*); на напряжение до 320 кВ и фокусным пятном 1,2×1,2 мм (кривая *5*); на напряжение до 420 кВ и фокусным пятном 1,5×1,5 (кривая *6*); *б* — расстояние фокусное пятно — мишень рентгеновского видикона 200 мм; расстояние объект — мишень 10 мм; излучатель напряжением до 160 кВ с фокусным пятном 0,4×0,4 мм; *h* — толщина ОК

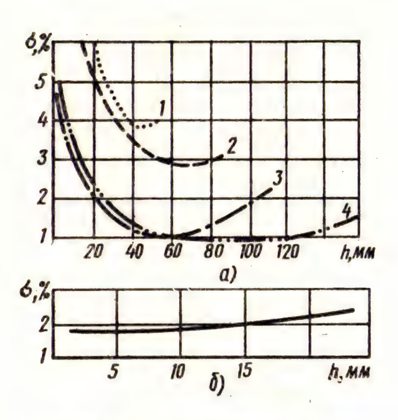


Рис. 4.48. Относительная чувствительность σ радиационного контроля алюминиевых изделий по проволочному эталону в условиях, соответствующих рис. 4.55, *а* (*а*) и рис. 4.44, *б* (*б*)

линейность детекторов может быть значительно улучшена по сравнению с телекамерой;

скорость передачи данных достаточно мала, и они легко могут быть преобразованы в цифровую форму и введены в память ЭВМ.

Преимущества *схем с игольчатым пучком*:

возможность регистрации всей гаммы эффектов взаимодействия излучения с ОК, что позволяет получать очень богатую информацию об объекте (например, о распределении химических элементов по ОК);

возможность получения микропучков размером 1 мкм и меньше.

Относительная чувствительность метода радиационного контроля схем с широким пучком представлена на рис. 4.47 и 4.48. Кривые *1* на рис. 4.47 и 4.48 характеризуют чувствительность современных флюороскопов — устройств, в которых в качестве радиационно-оптического преобразователя используется флюоресцентный экран, кривые *2* относятся к системе, содержащей флюороскопический экран с рабочим полем 24×32 см, оптически связанный с телевизионной системой, в качестве преобразователей свет—сигнал которой могут быть использованы передающие телевизионные трубки типа «видикон», «плюмбикон» и др., кривые 3 характеризуют систему, содержащую флюороскопический экран с рабочим полем 24×32 см, оптически связанный при помощи зеркала и объектива с телевизионной передающей трубкой типа «изокон». Графики 4—6 определяют чувствительность систем с РЭОП (рис. 4.48, *а*). Графики рис. 4.47, *б* и 4.48, *б* относятся к системе, в которой в качестве радиационного преобразователя используется рентгеновский видикон с диаметром рабочего поля 25 мм.

Существующие системы с веерным пучком по сравнению с системами с широким пучком благодаря уменьшению рассеянного излучения, падающего на преобразователь, позволяют получать лучшую контрастность изображения при одинаковой дозе облучения ОК или создавать минимальную дозовую нагрузку на него при том же качестве изображения, поэтому в основном они используются при контроле объектов, чувствительных к дозовым нагрузкам: контроль ручной клади багажа авиапассажиров, посылок, контейнеров и т. п. Предел разрешения этих систем достигает 2 пары лин./мм.

Системы с игольчатым пучком обладают всеми преимуществами систем с веерным пучком и, кроме того, позволяют извлечь информацию о рассеивающей способности объекта в зависимости от координат рабочего пучка излучения и энергии квантов. Одна из таких систем представлена на рис. 4.46.

4.5.2. Вспомогательное оборудование радиационных интроскопов и методика работы с ним

Вспомогательное оборудование для радиоскопии определяется конструктивными особенностями ОК и экономическими факторами и в общем случае состоит из:

автоматического устройства помещения (снятия) ОК на ходовой механизм с поточной технологической линии;

автоматического ходового механизма, обеспечивающего передвижение объекта контроля относительно пучка проникающего излучения;

автоматического указателя расположения зоны контроля ОК;

специального устройства, обеспечивающего удержание зоны

контроля просвечиваемого объекта в центре входного экрана преобразователя излучения;

устройства регулировки местоположения ОК при замене номенклатуры ОК;

пульта управления автоматическими процессами;

консолей или специальных устройств для крепления источников рентгеновского излучения и входных преобразователей радиоскопических систем;

устройств маркировки и записи дефектов;

защитных барьеров или боксов, обеспечивающих радиационную защиту обслуживающего персонала;

затемненных помещений или ширм.

Для повышения радиационной безопасности обычно источники проникающей радиации стремятся располагать в центре цилиндрических ОК. При конструировании вспомогательного оборудования особое внимание уделяется уменьшению вибраций ОК при их передвижении с помощью ходового механизма.

Методика радиоскопического контроля. По результатам предварительных исследований на контролируемые детали, узлы и изделия в установленном порядке разрабатываются технологические карты контроля, в которых указываются подлежащие контролю участки объекта, недопустимые по правилам контроля размеры дефектов, применяемое оборудование, режимы и схемы контроля, а также последовательность выполнения контрольных операций.

Подготовку источников излучения и радиоскопических установок к работе и работу на них следует проводить в соответствии с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации этих установок. Пульты управления с видеоконтрольными устройствами рентгенотелевизионных установок следует располагать так, чтобы на их экраны не попадал яркий солнечный или искусственный свет.

Необходимо обеспечить предварительную адаптацию зрения оператора к яркости свечения выходного экрана радиационного интроскопа.

Перед проведением контроля объекты необходимо тщательно осмотреть и рассортировать по группам с таким расчетом, чтобы проводить контроль с минимальным числом изменений режимов. Для определения местоположения возможных дефектов контролируемые участки деталей следует маркировать. Маркировку литых и других деталей выполняют свинцовыми или медными указателями и цифрами, укрепляя их на одной из поверхностей детали. Маркировку сварных соединений труб целесообразно осуществлять с помощью измерительных лент с нанесенными на них метками и цифрами из свинца или меди, отражающими длину (например, 1 см) контролируемого участка.

В начале и конце контроля каждой партии деталей, узлов и

изделий, а также в начале и конце рабочей смены следует проверять чувствительность контроля по соответствующим эталонам, устанавливаемым современными действующими стандартами.

Первую контролируемую деталь из партии с укрепленными на ней эталоном чувствительности и маркировочными знаками устанавливают перед входным экраном преобразователя излучения на заданном от него расстоянии. Затем на указанном в технологической карте фокусном расстоянии устанавливают источник излучения. Включив в сеть радиоскопическую установку,

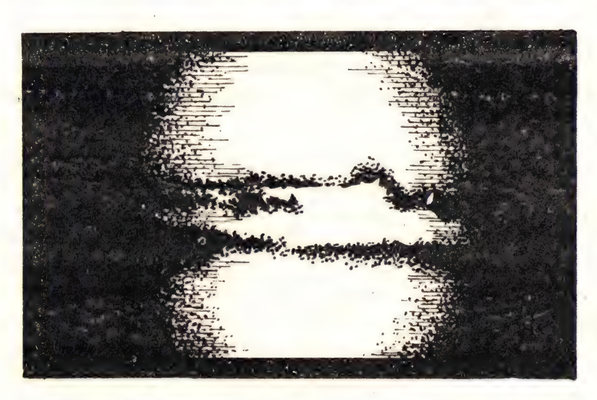


Рис. 4.49. Фотография цилиндрического сварного шва с экрана видеоконтрольного устройства рентгенотелевизионного интроскопа (дефекты — непровары и поры)

настраивают ее в соответствии с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации. После этого, включив источник излучения, устанавливают на нем малые анодное напряжение и ток, необходимые для получения очертаний изображения ОК, и по этим очертаниям диафрагмируют рабочее поле преобразователя любым из известных способов. Затем, установив заданные в технологической карте анодное напряжение и ток, определяют чувствительность контроля по укрепленному на ОК эталону чувствительности.

Контроль деталей и узлов радиоскопическим методом следует проводить, используя дистанционно управляемый механический манипулятор, который обеспечивает крепление, а также необходимые перемещения ОК и отметку на нем дефектных мест. Во избежание повреждения чувствительных элементов радиоскопической установки или нарушения темновой адаптации глаз контролера при значительном повышении яркости экрана при смене ОК следует применять защитные заслонки.

При радиоскопическом контроле качество ОК (рис. 4.49) и недопустимые вложения в багаж оценивают непосредственно во время просвечивания. При разбраковке ОК необходимо руко-

водствоваться картами контроля или другой документацией, утвержденной в установленном порядке.

Регистрацию результатов контроля следует проводить с использованием фотоаппаратуры, которой укомплектованы радиоскопические установки, или с помощью автономных средств магнитной видеозаписи.

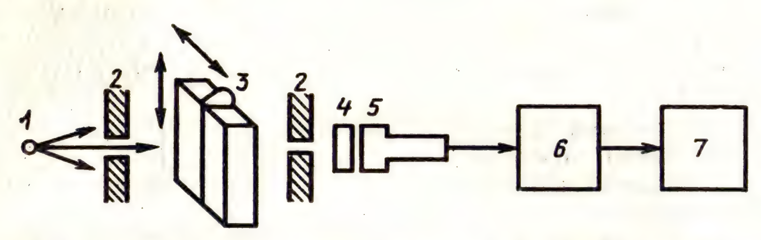


Рис. 4.50. Схема радиометрического контроля с использованием прошедшего ОК первичного излучения:

1 — источник излучения; 2 — коллиматор; 3 — ОК; 4 — преобразователь рентгеновские фотоны — свет; 5 — преобразователь свет — электрический сигнал; 6 — усилитель; 7 — регистрирующее устройство

§ 4.6. РАДИОМЕТРИЯ

Радиометрический метод радиационного неразрушающего контроля (радиометрия) основан на измерении одного или нескольких параметров ионизирующего излучения после его взаимодействия с ОК.

Таблица 4.12

Типы источников излучения при радиометрическом контроле в зависимости от толщины просвечиваемого сплава, мм

Тип источника излучения	Сплав на основе		
	железа	титана	алюминия
Радиоактивные источники β-излучения	0,02 ... 1	0,05 ... 3	1 ... 20
Рентгеновские аппараты	1 ... 130	2 ... 230	5 ... 370
Радиоактивные источники γ-излучения	1 ... 150	2 ... 330	5 ... 500
Бетатроны	Свыше 50	Свыше 90	Свыше 150

По характеру измеряемой на ОК величины *различают радиометрическую дефектоскопию* и *радиометрическую толщинометрию*. При решении задач дефектоскопии из-за локального расположения и малых размеров дефектов требуется быстродействующая регистрирующая аппаратура, а при решении задач толщинометрии возможно усреднение сигналов. В дефектоскопии

размеры апертуры коллиматора — устройства для формирования пучка направленного излучения — определяются размерами определяемых дефектов, а в толщинометрии сигнал усредняется на достаточно больших участках ОК.

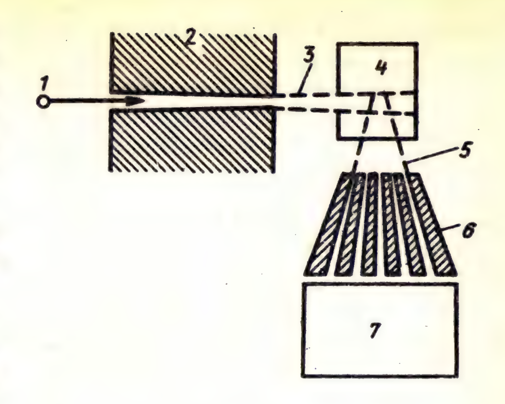


Рис. 4.51. Схема радиометрического контроля с использованием рассеянного ОК излучения:

1 — источник излучения; *2* — коллиматор первичного излучения; *3* — пучок первичного излучения; *4* — ОК; *5* — пучок рассеянного ОК излучения; *6* — коллиматор рассеянного ОК излучения; *7* — блок детектирования

По физическому принципу получения информации о характеристике ОК радиометрический контроль может быть основан на измерении параметров излучения, прошедшего ОК (рис. 4.50) и рассеянного (рис. 4.51).

При радиометрическом контроле в основном используют радиоактивные источники, рентгеновские аппараты, бетатроны (табл. 4.12).

В качестве детекторов применяют ионизационные камеры, полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы. Детекторы в зависимости от вида выходного сигнала разделяются на аналоговые и дискретные (рис. 4.52). При дискретном измерении определяется число импульсов на выходе детектора и могут возникнуть погрешности измерений двух видов: статистические и аппаратурно-статистические. При аналоговом измерении можно определить суммарный сигнал и возможны погрешности трех видов: аппаратурные по-

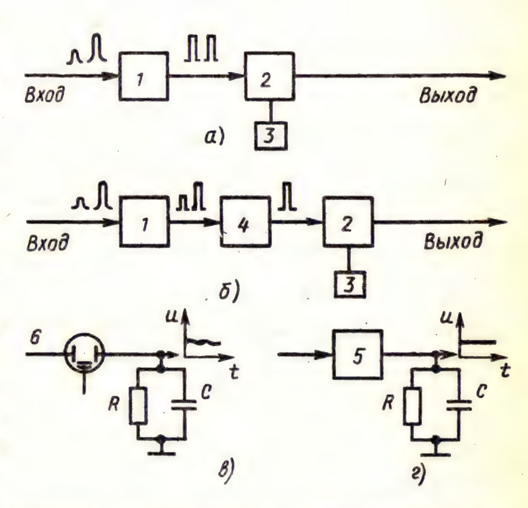


Рис. 4.52. Дискретная (*а*), дискретная с окном дискриминации (*б*), аналоговая (*в*), аналоговая с нормализацией импульсов тока схемы контроля (*г*):

1 — формирователь импульсов напряжения; *2* — пересчетное устройство; *3* — задатчик интервалов времени; *4* — амплитудный дискриминатор; *5* — формирователь импульсов тока; *6* — ФЭУ

грешности, статистические погрешности и аппаратурно-статистические погрешности.

Аппаратурная погрешность обусловлена в основном случайными изменениями параметров элементов, включенных в схему регистрации (дрейф коэффициента усиления). Ее можно характеризовать среднеквадратическим отклонением σ_a выходного сигнала. Статистическая радиационная погрешность определяется флюктуациями потока фотонов или частиц ионизирующих излучений и характеризуется средним квадратическим отклонением $\sigma_р$.

В счетной схеме регистрации измеряемой величиной является показание пересчетного устройства за время $t_и$. В стационарном режиме работы, когда фиксируется установившееся эффективное число статистически независимых импульсов $N_{эф}=Q_D N$, где N — число ионизирующих частиц, поступающих на детектор за время $t_и$, $\sigma_р=\sqrt{N_{эф}}$. В аналоговой схеме регистрации измеряемой величиной является напряжение $u(t)$ на интегрирующей цепочке RC, возникающее при поступлении на нее от формирователя дозируемых импульсов заряда ΔQ со средней частотой ν. При условии, что $t=0$ соответствует началу поступления импульсов зарядов, справедливы соотношения:

$$u(t)=\nu \Delta Q R\,[1-\exp(-t/\tau)],$$

$$\sigma_u^2=\frac{\nu\,[\Delta Q R]^2}{2\tau}\,[1-\exp(-2t/\tau)],$$

$$\delta_u^2=\left(\frac{\sigma_u}{u(t)}\right)^2=\frac{1}{\sqrt{2\nu\tau}}\sqrt{\frac{1-\exp(-2t/\tau)}{1-\exp(-t/\tau)}},$$

а для установившегося процесса (при $t\to\infty$)

$$u_0=\nu\Delta Q R,\quad \sigma_{u0}^2=\nu(\Delta Q R)^2/2\tau,\quad \delta_{u0}=1/\sqrt{2\nu\tau}.$$

Для схем без формирователя дозируемых импульсов заряда эти выражения нужно умножить на коэффициент $\kappa=\sqrt{m_0 m_r/m_1}$, где $m_i=\sum_j \Delta Q_j^i p(\Delta Q_j)$; $i=0,\ 1,\ 2$; $p(\Delta Q)_j$ — вероятность формирования заряда ΔQ_j схемой; κ изменяется в пределах 1 ... 1,5.

Аппаратурно-статистическая погрешность обусловлена наличием «мертвого» времени детектора, пересчетного устройства или счетчика, так как эти элементы после поступления на них импульсов тока или напряжения не регистрируют следующий импульс, пока не пройдет определенное время. Эта погрешность учитывается соотношениями между скоростью счета на выходе n и средней частотой ν поступления импульсов на вход элемента:

$$n=\nu\exp(-\nu\tau_п);\quad \nu=n/(1-n\tau_в),$$

где $\tau_п$ и $\tau_в$ — «мертвое» время соответственно для предельных (формирователи, дискриминаторы и т. п.) и непредельных (пересчетное устройство, одновибратор) элементов. В практике радиометрического контроля используют схемы, для которых $n \approx \nu$, и полная погрешность измерения $\sigma = \sqrt{\sigma_р^2 + \sigma_а^2}$

Для дальнейшего рассмотрения канала регистрации необходимо найти связь между входными параметрами схем регистрации и параметрами ОК. Пусть источник (рис. 4.53) создает на

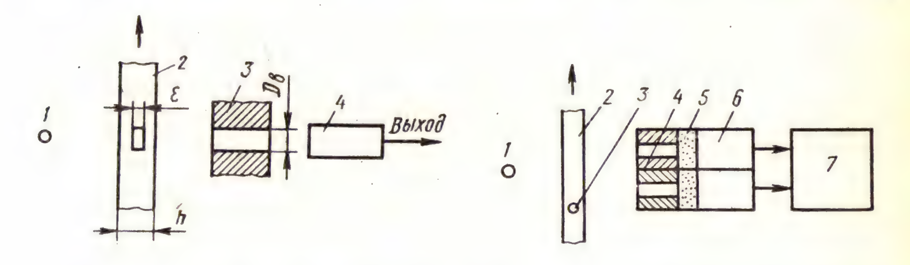


Рис. 4.53. Схема радиометрического контроля движущегося объекта с дефектом:

1 — источник излучения; 2 — ОК; 3 — коллиматор; 4 — блок детектирования

Рис. 4.54. Схема дифференциального контроля:

1 — источник излучения; 2 — ОК; 3 — дефект; 4 — коллиматоры; 5 — преобразователь рентгеновские фотоны — свет; 6 — преобразователь свет — электрический сигнал; 7 — схема сравнения

входе ОК плотность потока фотонов φ_{n0}, который перпендикулярен плоскости ОК. Радиационный дефектоскоп имеет коллиматор с прямоугольным окном размерами $D_в$ (высота) и b (ширина). ОК, выполненный из материала с коэффициентом μ линейного ослабления излучения источника и имеющий полость в виде куба размером $\varepsilon \ll h$, где h — толщина ОК, перемещается со скоростью v в направлении, указанном на рис. 4.53. «Мертвым» временем элементов канала регистрации пренебрежем. Тогда средняя скорость счета регистрируемых импульсов

$$\nu = \begin{cases} \nu_0 \left(\dfrac{\mu \varepsilon 3}{D_в b} + 1 \right) & \text{при } 0 \leqslant t \leqslant \dfrac{D_в}{v}, \\ \nu_0 & \text{при других } t, \end{cases}$$

где $\nu_0 = Q_D \varphi_{n0} D_в b e^{-\mu h}$ — эффективное число статистических импульсов при сканировании бездефектных участков ОК при условии, что вклад рассеянного ОК излучения в сигнал сведен к минимуму.

При поступлении нормированных импульсов с частотой ν на интегрирующую ячейку сигнал на ней описывается соотношением

$$u(t)=\begin{cases} u_0\left[1+\frac{\mu\varepsilon^3}{D_{\text{в}}b}\left(1-e^{-t/\tau}\right)\right] \text{ при } 0\leqslant t\leqslant\frac{D_{\text{в}}}{v}, \\ u_0\left[1+\frac{\mu\varepsilon^3}{D_{\text{в}}b}\left(1-e^{-D_{\text{в}}/v\tau}\right)\exp\left(-\frac{t-D_{\text{в}}/\tau}{\tau}\right)\right] \text{ при } t>\frac{D_{\text{в}}}{v}. \end{cases}$$

Пусть $\rho_N=\frac{|N-N_0|}{N_0}$, $\rho_u=\frac{|u-u_0|}{u_0}$ — случайные величины с нулевым средним, так как дефекты вносят незначительные возмущения в регистрируемый поток. Если N_0 или u_0 — средние величины на участках, не содержащих дефекты, то $\sigma(\rho_N)=\delta_N$, а $\sigma(\rho_u)=\delta_u$. В дальнейшем предполагается, что аппаратурная погрешность не превышает статистическую и $\sigma_р=\sigma_а$.

Для счетных схем регистрации с учетом (4.2) при времени накопления сигнала $t=D_{\text{в}}/v$ отношение сигнал/шум

$$q=\frac{\Delta\nu}{\sigma_N}=\frac{\rho_N}{\sigma(\rho_N)}=\frac{\mu V\kappa\sqrt{Q_D\varphi_{\text{п}0}e^{-\mu h}}}{\sqrt{2\Pi}},$$

где $V_g=\varepsilon^3$, $\Pi=bv$ — производительность контроля по площади; $\kappa=0{,}5...1$ — коэффициент, учитывающий, что в момент окончания и начала отсчета в канал регистрации поступает информация не от всего дефекта.

Критерием выявления дефекта считается условие $q\geqslant K$, где, например, $K=3$. Тогда

$$V_g\geqslant\frac{K}{\mu_{\text{к}}}\sqrt{\frac{A_{\text{к}}}{\nu_0}\sqrt{2\Pi}},$$

где $A_{\text{к}}=D_{\text{в}}b$ — площадь коллиматора.

Для токовых схем регистрации при $\tau=0{,}8D_{\text{в}}/v$ и $t=D_{\text{в}}/v$

$$V_g\geqslant\frac{K}{0{,}9\mu}\sqrt{\frac{A_{\text{к}}}{\nu_0}\sqrt{\Pi}}.$$

При дифференциальном методе измерения (рис. 4.54) за ОК симметрично оси рабочего пучка излучения размещают блок с двумя детекторами. При идентичных параметрах каналов измерения с использованием вычитающих схем детерминированные погрешности взаимно уничтожаются.

При просвечивании ОК большой толщины используют компенсаторный метод (рис. 4.55), радионуклидные источники с максимальной удельной активностью (отношение активности радионуклида в радиоактивном источнике к его объему) и регистрирующую аппаратуру с максимальным быстродействием (до 0,25 мкс).

При многоканальном радиометрическом контроле возможно повышение скорости контроля в n раз, где n — число каналов, однако схема регистрации при этом усложняется.

Радиометрический контроль эффективен для объектов, не имеющих локальных изменений толщины и плотности материала, так как изменение плотности потока фотонов, вызванное этими локальными неоднородностями по всей площади окна коллиматора, приводит к формированию сопутствующего сигнала, превышающего полезный сигнал.

Основные технические характеристики радиометрических дефектоскопов представлены в [32].

Измерители толщины материалов. Рентгеновские и радиоактивные измерители широко используют для бесконтактного автоматического контроля толщины листового проката в производстве путем регистрации прошедшего через материал излучения. Выбирая необходимые ускоряющее напряжение и ток рентгеновской трубки, с помощью рентгеновских толщиномеров можно осуществлять контроль, например, стального проката толщиной 0,002 ... 25 мм с погрешностью измерения 0,5% от верхнего значения диапазона измерений. Радиоактивные источники, в основном с β-активностью, используют для измерения толщины стальной полосы в диапазоне от нескольких микрометров до 0,8 мм, а источники с γ-активностью — для контроля горячего проката из стали толщиной 3,5 ... 40 мм. При контроле толщины алюминиевого проката верхнее значение диапазона увеличивается, а при контроле проката меди и сплавов на ее основе уменьшается.

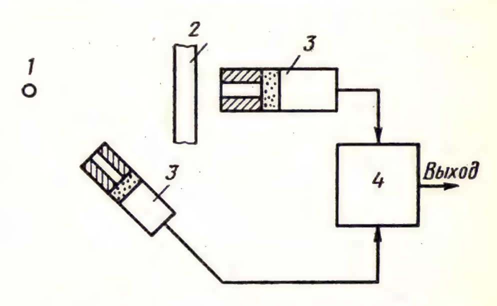


Рис. 4.55. Схема компенсационного контроля:
1 — источник излучения; *2* — ОК; *3* — детекторы; *4* — схема сравнения

Системы, основанные на регистрации прошедшего через ОК излучения, можно разделить на три группы: 1) прямого измерения параметров излучения — абсолютный метод; 2) сравнения параметров излучения в двух каналах путем их вычитания или деления — дифференциальный метод; 3) непрерывного сравнения параметров излучения в двух каналах измерения — компенсационный метод.

В системах прямого измерения (рис. 4.56) стабилизация напряжения и тока трубки осуществляется с помощью микропроцессоров. В качестве детекторов используются ионизационные камеры и сцинтилляционные счетчики [с кристаллом NaI(Te) на входе ФЭУ]. Детектор с предусилителем, как правило, помещают в термостат для снижения влияния температуры окружающей среды.

Измерители, работающие по методу сравнения двух потоков излучения, в зависимости от числа применяемых источников и приемников могут быть трех видов: с одним источником излучения и двумя приемниками; с двумя источниками и одним приемником; с двумя источниками и двумя приемниками.

Так, в отечественном толщиномере горячего проката ТРГ-7460 (рис. 4.57) пучки излучения от источников *1*, питаемых переменным напряжением частотой 50 Гц в противофазе, прошедшие через поглотители, регистрируются блоком детекторов *6*. Когда контролируемый ОК в виде полосы *5* отсутствует в рабочем потоке излучения, в него вводится образец задания *2* с помощью системы *11*, аналогичный образец *2* вводится в поток сравнения. Электрический сигнал с детектора через предварительный усилитель *7* поступает в электронный блок *8*, где обрабатывается таким образом, что компенсируются все погрешности, и показывающий прибор *9* показывает нуль. После этого система калибровки вводит на 3 с образец отклонения (на рисунке не показан) в рабочий поток излучения и проверяется масштаб отклонения толщины, поступающий на показывающий прибор в АСУ ТП и ЭВМ. С пульта или от ЭВМ с помощью системы *3* толщина клина выбирается такой, чтобы сумма его толщины с номинальным значением толщины ОК составляла толщину образца задания *2* в потоке сравнения.

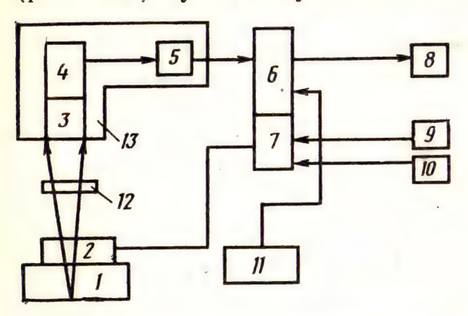


Рис. 4.56. Структурная схема толщиномера прямого измерения:

1 — источник излучения; *2* — градуировочный магазин стандартных образцов толщины; *3* — сцинтилляционный кристалл; *4* — ФЭУ; *5* — предусилитель; *6* — электронный блок; *7* — процессор; *8* — индикатор отклонений толщины полосы от номинала; *9* — корректор толщины ОК; *10* — корректор химического состава ОК; *11* — пульт управления толщиномера; *12* — ОК в виде полосы; *13* — охлаждающая рубашка

При вхождении ОК в рабочий поток излучения вырабатывается команда — сигнал, по которому система *11* выводит из рабочего потока образец *2* и вводит клин *4* задания выбранной толщины. Необходимое соотношение токов источников *1* обеспечивается регулятором тока *10*.

С момента ввода клина начинается измерение отклонения толщины (ОК) от заданной и вырабатывается соответствующий сигнал, поступающий на показывающий прибор, АСУ ТП стана и ЭВМ.

В толщиномере РИТ-4 (рис. 4.58) реализован метод обработки сигнала, заключающийся в том, что нелинейность ослабления рентгеновского излучения образцом можно частично скомпенси-

ровать на детекторе нелинейностью зависимости тока фотоэлектронного умножителя от высоковольтного напряжения. Для этого ток на выходе ФЭУ с помощью следящей системы (АРУ) поддерживается постоянным благодаря изменению напряжения пи-

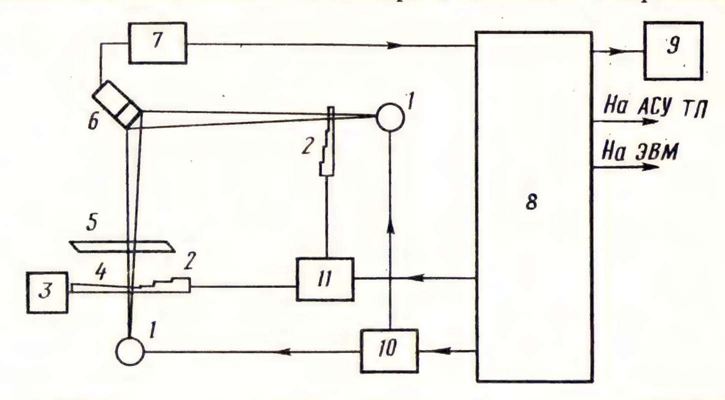


Рис. 4.57. Структурная схема рентгеновского толщиномера ТРГ-7460:

1 — источник излучения; *2* — образец толщины; *3* — система задания клина выбранной толщины; *4* — клин; *5* — ОК в виде полосы; *6* — блок детектирования; *7* — предусилитель; *8* — электронный блок; *9* — показывающий прибор; *10* — регулятор тока источников излучеия; *11* — система задания образцов толщины

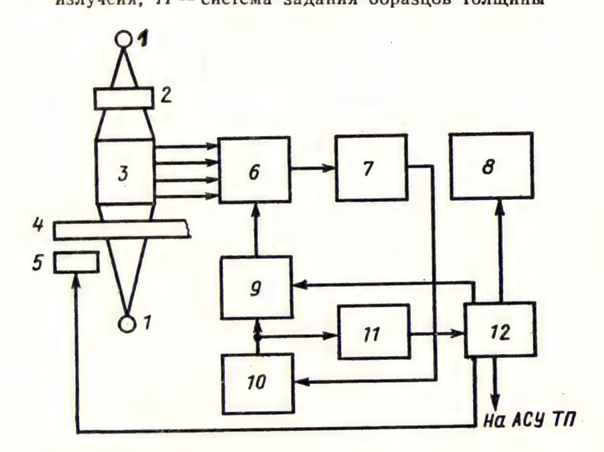


Рис. 4.58. Структурная схема толщиномера РИТ-4:

1 — источник излучения; *2* — образцы толщины; *3* — сцинтилляционный кристалл; *4* — ОК; *5* — подвижный образец толщины; *6* — ФЭУ; *7* — усилитель; *8* — показывающий прибор; *9* — блок питания ФЭУ; *10* — регулятор тока ФЭУ; *11* — блок обработки сигнала; *12* — контроллер

тания ФЭУ. Вследствие этого параметры импульсов напряжения питания ФЭУ почти линейно зависят от толщины образца или контролируемой полосы. Быстродействие мгновенной АРУ измерительной системы толщиномера составляет примерно 10^{-6} с.

Таблица 4.13

Технические характеристики толщиномеров проката

Наименование показателя	Толщиномеры холодного проката					Толщиномер горячего проката ТРГ-7460
	ТРХ-7180	ТРХ-7195	ТРХ-7430	РИТМ-1	РИТ-4	
Контролируемый материал	Сталь	Сталь	Медь	Медь	Сталь	Сталь
Диапазон толщин ОК, мм	0,2 ... 12,0 (семь модификаций)	0,2 ... 12,0 (семь модификаций)	0,2 ... 8,0	7,0 ... 16,0	0,01 ... 12,0	0,8 ... 16,0
Аппаратная составляющая погрешности при толщине ОК:						
0,2 ... 0,4 мм, мкм	±2,0	±2,0	±2,0	—	±0,2	—
0,4 .... 2,0 мм, %	±0,5	±0,5	±0,5	—	(от 2 мкм)	±0,5
4,0 ... 16,0 мм, мкм	±20	±20	±20	±20		±20
Среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности при толщине ОК:						
до 1,0 мм, мкм	2,0	2,0	2,0	—		5,0
свыше 1,0 мм, %	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
Быстродействие, с	0,02	0,02	0,02	0,1	0,02	0,02 ... 0,1
Время перестройки на новый номинал, с	10	10	10	10	5	10

При использовании метода исключаются электромеханические приводы следящей системы и связанная с ними инструментальная погрешность, возникающая при изготовлении клиньев задания и компенсации.

Основные технические характеристики отечественных измерителей толщины представлены в табл. 4.13.

Для проверки геометрии горячекатаного листа требуется измерение не только продольной разнотолщинности в процессе горячей прокатки, но и поперечной разнотолщинности. При решении этой задачи получили развитие два способа. В первом используют два рентгеновских толщиномера, один из которых контролирует толщину ОК в виде полосы по центру, другой перемещается поперек полосы и контролирует полосу по синусоидальной кривой, определяемой скоростями движения полосы и перемещения прибора. Разность показаний центрального и перемещающегося толщиномеров характеризует поперечный профиль полосы по толщине.

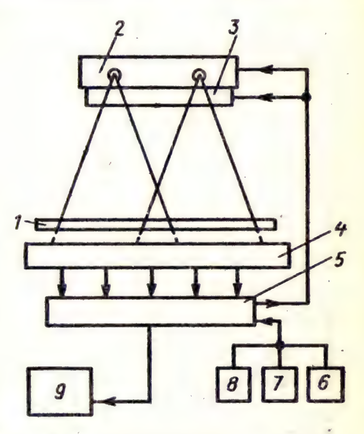


Рис. 4.59. Структурная схема измерения профиля ОК в виде полосы:

1 — ОК в виде полосы; *2* — блок с двумя источниками излучения; *3* — система стандартных эталонов; *4* — блок детекторов; *5* — микропроцессор; *6* — пульт задания химического состава; *7* — пульт задания толщины; *8* — пульт задания температуры; *9* — дисплей

Недостатком этого способа является то, что измерение происходит в двух разных сечениях полосы и, следовательно, на результате сказывается неодинаковое геометрическое положение полосы относительно потоков излучения. К юстировке толщиномеров предъявляются высокие требования. Так, наклон потока излучения относительно полосы свыше 3° приводит к дополнительной погрешности измерения толщины.

Во втором способе используется один прибор, измеряющий профиль объекта в виде полосы в одном сечении (рис. 4.59). Две рентгеновские трубки *2*, питаемые переменным ускоряющим напряжением в противофазе, генерируют узкие пучки рентгеновского излучения, пересекающие полосу *1* по всей ширине. В средней части полосы рентгеновские потоки перекрываются. Под полосой установлен ряд детекторов *4*, регистрирующих прошедшее излучение. Детектор по центральной оси полосы последовательно регистрирует излучение от обеих трубок, что позволяет проводить автоматическую коррекцию их токов.

Сигналы с детекторов поступают в микропроцессор *5*, который производит сравнение уровня сигналов, поступающих от каждого детектора, с сигналами, поступающими с пультов *5—8* задания соответственно значений толщины, химического состава и температуры полосы *1*. В микропроцессоре происходит расчет профиля полосы по заданной программе для каждой точки ОК, против которой установлен детектор, и сравнение с толщиной в центре полосы. Информация об отклонении толщины по ширине полосы преобразуется в электрические сигналы и отображается на дисплее *9* в виде прямоугольной гистограммы. Быстродействие прибора составляет 0,05...1,0 с. Для калибровки в приборе имеется набор стандартных образцов *3*, который может быть в момент отсутствия полосы введен в потоки излучения.

§ 4.7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАДИАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ

Эффективность контроля, обеспечение благоприятных условий для работы обслуживающего персонала и его безопасности во многом определяются организацией работы дефектоскопических лабораторий, а также выполнением соответствующих требований к проведению этих работ. Все это сводится к комплексу технических, организационных и эксплуатационных мероприятий, обеспечивающих высококачественное выполнение работ, а также радиационную и техническую безопасность обслуживающего персонала и окружающего населения.

В зависимости от объема работ, места их проведения, возможности транспортировки ОК на предприятиях организуют стационарные лаборатории, которые оснащаются соответствующей аппаратурой, радиометрическими и дозиметрическими приборами, вспомогательным оборудованием и комплектуются кадрами.

При строительстве специальных зданий для дефектоскопических лабораторий или переоборудовании имеющегося помещения составляется техническое задание, в котором должны быть учтены требования санитарных норм проектирования промышленных предприятий и действующих санитарных правил и норм при работе с источниками ионизирующего излучения. В техническом задании указываются расчетные значения толщины и материала защиты, требования, предъявляемые к вентиляции, водопроводу, канализации, отоплению, энергетическому оборудованию и отделке помещений. Техническое задание на дефектоскопические лаборатории с применением высокоэнергетических источников ионизирующих излучений подлежит согласованию с местными органами санитарно-эпидемиологической службы.

Стационарные лаборатории для дефектоскопии организуются, как правило, на машиностроительных или металлургических заводах. Целесообразно размещать их в отдельных зданиях или пристройках к цехам. Не рекомендуется размещать дефектоскопические лаборатории в многоэтажных зданиях, и особенно в их верхних этажах. При контроле крупногабаритных и металлических конструкций стационарные лаборатории располагаются в специальных выгородках внутри крупных цехов предприятий.

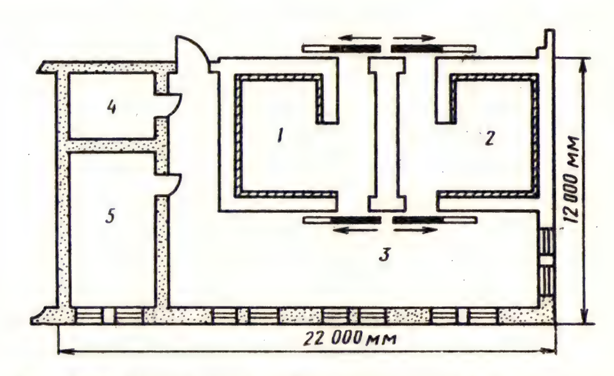


Рис. 4.60. Планировка дефектоскопической лаборатории:
1, 2 — помещение для просвечивания; *3* — пультовая; *4* — фотокомната; *5* — помещение для расшифровки снимков

Стационарные лаборатории состоят из защитной камеры, пультовой, фотолаборатории, помещений для обслуживающего персонала, для расшифровки радиографических пленок и их хранения, душевых, санузлов. Типовая схема планировки лаборатории, расположенной в цехе, приведена на рис. 4.60. В камерах стационарных лабораторий должна быть предусмотрена соответствующая защита. Расчет защиты должен выполняться исходя из экспозиционной дозы тормозного излучения, энергии излучения, расстояния до ближайшей точки защищаемого помещения и допустимых значений мощности дозы излучения в смежных помещениях.

Работа в специально отгороженных участках цехов разрешается администрацией предприятия после согласования с местными органами санитарно-эпидемиологической службы. При сооружении таких участков необходимо выполнение следующих мероприятий: вход на участки для просвечивания должен выполняться в виде лабиринта или двери со специальной защитой (бетон, свинец, стальная или свинцовая дробь); двери должны блокироваться с механизмом включения установки так, чтобы исключить возможность открывания двери при включенной установке; в

период просвечивания на пульте управления и на участке просвечивания должны включаться предупреждающие световые сигналы, хорошо заметные для окружающих. В тех случаях, когда ОК подается на участок просвечивания сверху с помощью подъемных кранов, проемы в потолке должны иметь минимальные размеры и соответствующую защиту в виде створок, плит, наклонных барьеров и пр.

Системы радиационного неразрушающего контроля промышленных изделий условно можно разбить на два класса: 1) для контроля крупногабаритных объектов (корпусов транспортных средств, валов турбин и т. п.) и 2) для контроля объектов небольшого объема, главным образом литья из алюминия, магния и их сплавов.

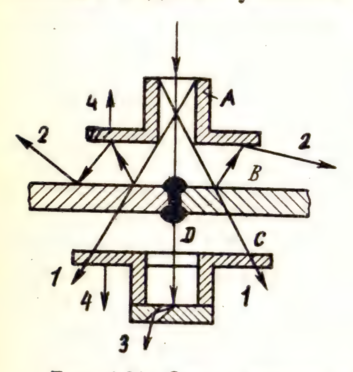


Рис. 4.61. Схема защиты от рентгеновского излучения при контроле сварного шва:
A — ограничивающий коллиматор; *B* — контролируемый объект; *C* — экранирующее устройство; *D* — преобразователь рентгеновские фотоны — электрический сигнал

Реализация той или иной системы контроля связана с созданием биологической защиты персонала от воздействия ионизирующего излучения источника. В [31, 32] описаны методы расчета и приведены практические рекомендации по созданию рациональных защитных ансамблей. Радиационный контроль целесообразно проводить в стационарных условиях — в специально оборудованных помещениях или в защитном боксе, окружающем источник излучения и радиационно-оптический преобразователь, снабженный средствами усиления и трансляции изображения.

Выбор конфигурации устройств биологической защиты и ее конструктивное решение определяются предпочтительной геометрией просвечивания, а также энергией и мощностью дозы излучения, генерируемого источником.

Схема просвечивания крупногабаритных объектов в нестационарных условиях показана на рис. 4.61, где схематически показаны наиболее вероятные направления распространения рассеянного излучения — цифры *1—4*. Поле рассеянного излучения формируется в результате протекания четырех процессов: 1) прямого прохождения пучка через конструкционные материалы защитного ансамбля; 2) многократного рассеяния в зазорах между коллиматорами и объектом; 3) многократного рассеяния от стенок канала для ввода электрических линий связи; 4) характеристического излучения, сопровождающего фотоэлектрическое поглощение излучения источника.

Для поглощения излучения используются защитные экраны

из материалов с большим атомным номером, главным образом из свинца и стали. При расчете свинцовых защитных экранов необходимо учитывать, что при $E>100$ кэВ процесс фотопоглощения сопровождается эмиссией характеристического излучения, энергия которого составляет 90 кэВ. Поэтому при работе с источниками высокоэнергетического излучения рекомендуются комбинированные экраны, в частности указывается на преимущество многослойных экранов, изготовленных из сплава (с элементами Sn, Sb, Ba). Экспериментальные результаты подтверждают большую тормозную способность сплавов по сравнению с чистыми веществами. Кроме того, экраны можно выполнять послойно, чередуя слои свинца и слои более легкого элемента.

Электрические коммуникации в устройствах биологической защиты вводятся через каналы в ее стенках. В зависимости от гибкости кабеля канал выполняется зигзагообразным или наклонным. При наклонном вводе кабель уплотняется стальным скрапом (бракованные шарики подшипников, отходы прокатного производства в виде оксидов железа, мелкозернистой стружки и т. п.) со связующим. Связующим служат быстро затвердевающие органические клеящие вещества на основе эпоксидных смол.

Характеристическое излучение подавляется декоративными красящими веществами, покрывающими наружную сторону защитной конструкции. Как правило, покрытия состоят из последовательных слоев оксидов свинца, железа и кальция. Суммарная поверхностная плотность лакокрасочного покрытия не превышает 300 мг/см². Исходя из этого наносят слои краски в следующем процентном соотношении: 70...90% PbO; 5...25% Fe_2O_3; 5...10% $CaCO_3$.

В радиоскопах для контроля малогабаритных объектов из легких сплавов защитные экраны от рассеянного излучения удобно выполнять в виде набора из профилированного проката черных металлов, например уголков.

Когда архитектура защитного ансамбля в целом ясна, необходимо предусмотреть мероприятия, предотвращающие случайные облучения обслуживающего персонала. Чтобы не было нежелательных включений, системы радиационного контроля снабжают шлюзом, перекрывающим пучок излучения ускорителя. Работой шлюза управляют вручную или с помощью исполнительного механизма.

Проемы в защитных стенах для труб, проводов, вентиляционных устройств (прокладка проводов, кабелей под полом, косая или лабиринтная проводка) должны быть выполнены так, чтобы действие радиационной защиты не снижалось. При проводке кабеля он иногда уплотняется стальным скрапом со связующим. Чтобы исключить возможность натекания многократно рассеянного ионизирующего излучения по внутрижильному каналу кабелей, целесообразно применять свинцовую изоляцию и защитные

козырьки. Лабиринтная проводка оправдывается тем, что мощность дозы излучения от рассеивающего объекта на расстоянии 1 м от него составляет приблизительно 0,02 ... 0,05% мощности дозы у поверхности объекта на каждые 100 см² зоны облучения, т. е. можно утверждать, что мощность дозы рассеянного излучения на расстоянии 1 м от облучаемого объекта не превышает 1% аналогичной мощности дозы на его поверхности.

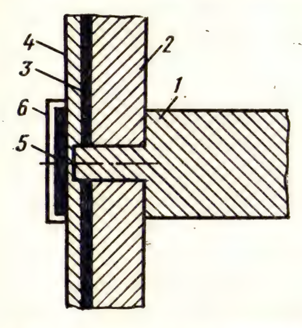


Рис. 4.62. Схема компенсации ослабления защиты конструкционными ансамблями:

1, 2 — балки перекрытия; *3* — свинцовый экран; *4* — декоративная панель; *5* — дополнительный свинцовый экран; *6* — фиксатор экрана

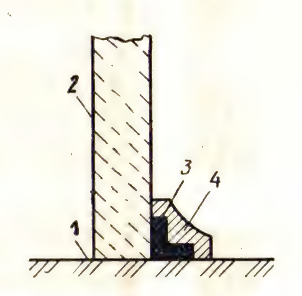


Рис. 4.63. Защита места сопряжения стены и пола:

1 — пол; *2* — защитная стена; *3* — свинцовый экран; *4* — декоративный плинтус

Довольно часто защитные свойства свинцовых экранов ослаблены из-за наличия в них шурупов, гвоздей и т. п. В таких местах должны быть образованы соответствующие перекрытия из защитного материала (рис. 4.62). Экранирующий материал из свинца монтируется так, чтобы он не начал течь под действием собственной массы. В тех случаях, когда радиоскопическая установка расположена над помещением, в котором могут находиться люди, особая забота должна быть проявлена об их защите. Вполне достаточно покрыть пол свинцовым покрытием необходимой толщины. Однако при этом могут возникать ситуации, когда тяжелое оборудование углубляется в свинцовую защиту, уменьшая ее эффективную толщину и снижая ее защитные свойства. На места сопряжения защитных стен с полом следует обращать особое внимание, а в некоторых случаях снабжать их дополнительной защитой (рис. 4.63).

Детально прорабатываются конструкции дверей, ворот и окон. Двери и ворота должны иметь то же экранирующее действие, что и граничащие с ними стены. Экранирующая толщина дверей может быть уменьшена, если между дверью и излучателем встраивается лабиринт (рис. 4.64). Двери выполняются так, чтобы не было щелей для проникновения излучения. Для этого защитный

слой двери должен быть расположен в непосредственной близости от стены и перекрывать ее, по крайней мере, на ее толщину.

На входах с двухстворчатыми дверьми обычно предусматриваются пороги. Во всех дверных входах встраиваются дверные контакты, размыкающие высоковольтные цепи, когда открываются двери. Во многих случаях дверные ручки со стороны коридора убирают, а двери конструируют так, чтобы можно было открыть их изнутри и в случае необходимости люди смогли бы сразу же покинуть помещение.

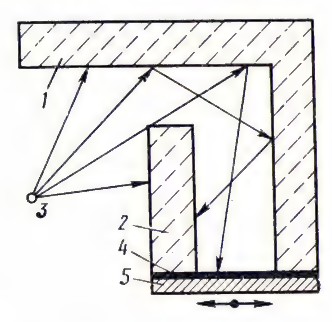


Рис. 4.64. Схема защиты дверей:

1 — защитная стенка; *2* — стена лабиринта; *3* — излучатель; *4* — свинцовый экран; *5* — дверь

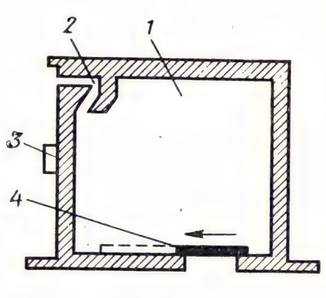


Рис. 4.65. Планировка помещений бетатронной дефектоскопической лаборатории:

1 — помещение для просвечивания; *2* — лабиринтный проход для персонала; *3* — пульт управления; *4* — защитная дверь для подачи ОК

На рис. 4.65 приведена планировка помещения для бетатронной дефектоскопии, имеющего лабиринтный вход (для персонала) и защитную дверь, через которую транспортируются объекты для просвечивания. Бетатрон с максимальной энергией тормозного излучения, равной 15 МэВ, смонтирован на кране и может быть установлен в любом помещении для просвечивания площадью около 300 м^2. Вход в помещение для просвечивания обычно находится в местах с наименьшим уровнем излучения и осуществляется через лабиринт в защитной стене с обычной или защитной дверью. В [31] рассмотрены различные типы защитных дверей, применяемых в помещениях для размещения ускорителей заряженных частиц. Конструкции дверей различаются в зависимости от массы, площади, подвижности и усилия, необходимого для передвижения двери.

Наиболее дешевыми являются скользящие (роликовые) и вращающиеся двери. Скользящие двери отличаются подвижностью и простотой. Их монтируют на рельсовых тележках и открывают по рельсам или подвешивают на балке на роликах. В последнем случае экономится площадь пола. Вращающиеся

двери представляют цилиндр с проемом по диаметру. Дверь поворачивается вокруг своей оси на подшипниках, пока ее проем не совместится с входным отверстием в защитной стене. Скорость открывания двери ограничена ее инерционностью. Двери других типов (качающиеся, угловые и др.) применяются реже. Установка их целесообразна лишь при определенных условиях.

Важно предусмотреть меры для предотвращения попадания людей между движущимися и неподвижными частями двери. Конструкция защитной двери должна исключать возможность движения двери, когда в ее проеме находится человек. Недостатком защитных дверей являются их инерционность и значительная стоимость. Однако применение защитных дверей вместо лабиринтных входов позволяет экономить производственную площадь и защитные материалы (бетон), уменьшать затраты на строительство.

В тех случаях, когда дверной проем невелик, целесообразнее сооружать лабиринтный вход, а не устраивать защитные двери, имеющие большую массу и требующие постоянного обслуживания. Можно существенно уменьшить толщину, а следовательно, и массу защитной двери, если вход в помещение для просвечивания расположить таким образом, чтобы на дверь падало только рассеянное излучение. Для этого сооружают бетонный выступ.

При поточном контроле сварных изделий вход/выход камеры для просвечивания изделий может содержать набор разрезанных на полосы пластин из рентгенозащитной резины (шторки), которые при действии собственной массы перекрывают рассеянное излучение при просвечивании прошедшего через них объекта. При монтаже окон из рентгенозащитного стекла нужно обращать внимание на то, чтобы свинцовый эквивалент на них был достаточно хорошо протравлен. На стандартные окна приделывают защитные ставни, которые, как и двери, должны быть снабжены контактами для размыкания высоковольтных цепей. При открытых сверху установках лучевая нагрузка на верхнюю часть стены должна быть минимальной. Иногда над открытой сверху установкой может перемещаться кабина, из которой управляют краном. В этом случае следует установить на пути крана контакты, которые отключали бы высокое напряжение на излучателе, когда ионизирующее излучение рассеивается над барьером стены (рис. 4.66). Это явление иногда называют «сиянием». В помещении для облучения на видном месте следует разместить таблицу, на которой должны быть указаны максимально допустимые параметры излучателя (ток, напряжение) и направление просвечивания. Кроме того, на экранах и стенах отмечаются тип экранирующего материала и его свинцовый эквивалент.

К началу работ администрация предприятия должна выделить необходимое число лиц, ответственных за эксплуатацию установок, обеспечить их обучение и инструктаж. Повторный

инструктаж должен проводиться систематически, не реже одного раза в 6 мес. Одновременно администрация предприятий должна обеспечить и утвердить детальные инструкции, в которых излагаются порядок проведения работ, учета, хранения и выдачи дефектоскопов, режим содержания помещений, меры личной профилактики, система организации, объем и порядок проведения радиационного контроля. На период пусконаладочных работ должны быть разработаны специальные инструкции. При любом изменении условий работ в утвержденные инструкции должны быть внесены необходимые поправки, дополнения и должен быть проведен внеочередной инструктаж персонала, проверка знаний правил безопасности работы и личной гигиены.

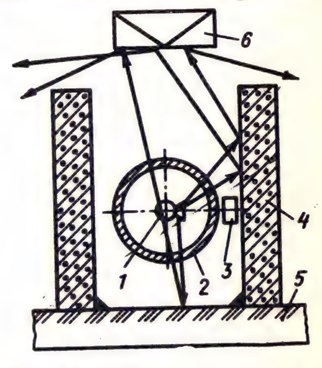


Рис. 4.66. Схема излучения конструкционными ансамблями:

1 — излучатель; 2 — ОК; 3 — радиационный преобразователь; 4 — защитная стена; 5 — пол; 6 — дверь мостового крана

Кроме того, должна быть составлена и согласована с местными органами санитарно-эпидемиологической службы и Госпожнадзора инструкция по предупреждению переоблучения работающих и загрязнения внешней среды радиоактивными веществами при ликвидации аварий (пожаров). В этой инструкции должны быть изложены необходимые мероприятия, проводимые администрацией предприятия при возникновении пожара до прибытия местной пожарной части и в начале тушения пожара, в том числе в ней должно быть указано, что в случае возникновения пожара необходимо прекратить все работы, предварительно обесточив аппаратуру и выключив вентиляцию; изложен порядок оповещения администрации предприятия, пожарной части, вызова дозиметристов, организации дозиметрического контроля за сотрудниками предприятия и личным составом пожарной части. Ответственность за обеспечение радиационной безопасности и промышленной техники безопасности возлагается на администрацию предприятия.

Проектирование защиты проводится исходя из мощности эквивалентной дозы излучения на поверхности защиты (табл. 4.14). Дополнительно должны быть учтены и такие факторы, как наличие других источников ионизирующего излучения, воздействующего на облучаемых лиц, перспективное увеличение мощности источников излучения, повышение радиочувствительности материалов и аппаратуры. При проектировании защиты обычно вводится коэффициент запаса, равный двум, учитывающий неточности в исходных проектных данных, определяющих защиту.

Если заранее известно, что установки включаются на время, отличающееся от общепринятого, то проектная мощность эквивалентной дозы может приниматься из расчета $P_0=D_0/(2t)$, где D_0 — недельная доза, соответствующая предельно допустимой годовой дозе, установленной для персонала, мбэр/нед; t — длительность работы персонала на установке, ч/нед.

Таблица 4.14

Мощность эквивалентной дозы излучения на поверхности защиты

Категория облучаемых лиц	Назначение помещений и территорий	Проектная мощность дозы, мбэр/ч
Категория А (t=36 ч в неделю, 50 нед. в году)	Помещения постоянного пребывания персонала категории А	1,4
	Помещения, в которых персонал пребывает не более половины рабочего времени	2,8
Категория Б (t=41 ч в неделю, 52 нед. в году)	Любые помещения учреждения и территория санитарно-защитной зоны, где могут находиться лица, относящиеся к категории Б	0,12
Категория В (t=168 ч в неделю, 52 нед. в году)	Любые помещения (в том числе жилые) и территория в пределах зоны наблюдения	0,03

К каждому функциональному помещению лаборатории предъявляются особые требования. В съемочных камерах, где располагаются источники высокоэнергетического излучения, должна быть предусмотрена система блокировки и сигнализации, исключающая попадание персонала в камеры в момент просвечивания ОК. Для этих целей обычно применяют механические и электромеханические системы, связанные с сигнализацией. Сигнальные лампы на пульте управления включаются и выключаются электрическими контактами, срабатывающими от приборов, регистрирующих мощность экспозиционной дозы излучения в камере. Вход в камеру (дверь) блокируется с включением установок. Во избежание случайного облучения лиц, оказавшихся в камере при закрытых дверях, в ней предусмотрено устройство, с помощью которого можно подать сигнал тревоги на пульт управления установкой.

Основным требованием к блокировке и сигнализации является надежность их срабатывания, так как неточности срабатывания могут привести к поломкам механизмов, нарушению безопасности и другим нежелательным последствиям. Увеличению надежности блокировки и сигнализации способствует их одновременное действие; в особо ответственных случаях все устрой-

ства дублируют. Кроме вредного воздействия ионизирующего излучения необходимо учитывать сильную ионизацию воздуха и появление в больших концентрациях озона и оксидов азота. Поэтому в камерах устанавливают вентиляцию с кратностью воздухообмена от 6 до 10.

В пультовой расположены пульты управления ускорителем и защитными дверями, манипуляторами и грузоподъемными механизмами. В фотокомнате производят зарядку радиографической пленки в кассету и ее фотохимическую обработку. В радиографической лаборатории целесообразно иметь две фотокомнаты — для «сухой» и «мокрой» обработки пленки. Обычно рядом с фотокомнатой располагается архив лаборатории. Необходимо учитывать, что в этих помещениях находится большое количество радиографической пленки, часть которой может быть на нитроцеллюлозной основе. Эта пленка является пожароопасным материалом. В случае воспламенения тушение пожара затруднено из-за выделения продуктов горения — смеси ядовитых и удушливых газов (угарного газа, синильной кислоты и др.). Поэтому в таких помещениях необходимо строго соблюдать специальные правила противопожарной безопасности. В лабораториях на видном месте вывешивают инструкции по пожарной безопасности, с которыми необходимо ознакомить весь персонал лаборатории. В специально отведенном месте устанавливают огнетушители типа УО-2 или ОК-5.

Требования к естественному и искусственному освещению и оборудованию вентиляции в помещениях лаборатории устанавливают в соответствии с требованиями строительных норм. В камере установок оборудуют местную вытяжную вентиляцию с очисткой удаляемого воздуха от аэрозолей.

Мощность эквивалентной дозы излучения в любых помещениях лаборатории, где находится персонал (категория облучаемых лиц А), не должна превышать 0,1 мбэр/ч, в любых помещениях данной организации и на территории в пределах наблюдаемой зоны (категория облучаемых лиц Б) она не должна превышать 0,03 мбэр/ч.

При организации работы передвижных лабораторий радиационного контроля предъявляются дополнительные требования по обеспечению радиационной безопасности обслуживающего персонала и окружающего населения. Так, приказом руководства предприятия, эксплуатирующего лабораторию, на старшего оператора возлагают ответственность за радиационную безопасность. При ночевках персонала в населенных пунктах передвижные лаборатории должны размещаться на охраняемых территориях в запираемых гаражах.

Строгое соблюдение действующих санитарных правил работы с источниками ионизирующего излучения, норм радиационной безопасности, инструкций по эксплуатации применяемой аппара-

туры сводят к минимуму возможность облучения персонала при проведении высокоэнергетической дефектоскопии. В случае нарушения указанных требований возможно переоблучение персонала, что приводит к необратимым изменениям в организме или в отдельных его органах.

4.7.2. Дозы облучения и дозиметрический контроль

Биологическое действие ионизирующего излучения пропорционально поглощенной дозе излучения и зависит от его вида. Поэтому для сравнения биологических эффектов различного вида излучения должна учитываться его относительная биологическая эффективность. Для оценки радиационной опасности при

Таблица 4.15

Относительная биологическая эффективность различного вида ионизирующих излучений

Вид излучения	$k_к$	Вид излучения	$k_к$
γ-излучение	1	Нейтроны с энергией:	
Рентгеновское	1	5 кэВ	2,5
Электроны и позитроны	1	10 кэВ	5
β-излучение	1	100 кэВ	8
α-излучение (E=10 МэВ)	10	500 кэВ	10
Протоны (E=10 МэВ)	10	1 МэВ	10,5
Тяжелые ядра отдачи	20	5 МэВ	7
Нейтроны тепловые	3	10 МэВ	6,5

хроническом облучении всего тела определяют эквивалентную дозу $P_{эк}$, полученную человеком. Эта доза учитывает относительную биологическую эффективность отдельных видов ионизирующего излучения с помощью коэффициентов качества ($k_к$) (табл. 4.15). Эквивалентная доза $D_{эк}$ определяется как сумма произведений поглощенной дозы D_{0i} отдельных видов излучения на соответствующие коэффициенты качества этих излучений:

$$D_{эк}=\sum_i D_{0i}\,(k_к)_i.$$

Единица эквивалентной дозы в СИ — зиверт (Зв); 1 бэр = =0,01 Зв.

Чтобы исключить возможность возникновения соматических и генетических поражений организма человека, установлены предельно допустимые дозы внешнего и внутреннего облучения персонала, занятого на работах с источниками ионизирующего излучения. Этими нормами определены содержание радиоактив-

ных веществ в органах или тканях человека, способствующих предельно допустимым дозам облучения, допустимые уровни загрязнения кожного покрова. Исходя из возможных последствий влияния ионизирующего излучения на организм, установлены следующие категории облучаемых лиц:

Категория А — лица, которые непосредственно работают с источниками ионизирующего излучения или по роду своей работы могут подвергаться облучению. В категорию А входят две группы: 1) лица, условия труда которых таковы, что дозы облучения могут превышать 0,3 годовой предельно допустимой дозы (сюда относятся работники лабораторий, связанные непосредственно с работой с источниками ионизирующего излучения); 2) лица, условия труда которых таковы, что дозы облучения не могут превышать 0,3 годовой предельно допустимой дозы. *Категория Б* — отдельные лица из населения, проживающие на территории, где доза облучения может превышать установленные значения. *Категория В* — население в целом.

Таблица 4.16

Предельно допустимые дозы облучения (бэр)

Группа критических органов или тканей	Критические органы или ткани	Для персонала		Для населения
		за квартал	за год	за год
I	Все тело, гонады, красный костный мозг	3*	5**	0,5
II	Любой орган, кроме гонад, красного костного мозга, костной ткани, щитовидной железы, кожи, а также кистей, предплечий, лодыжек и стоп	8	15	1,5
III	Костная ткань, щитовидная железа, кожный покров всего тела (кроме кожи кистей, предплечий, лодыжек и стоп)	15	30	3***
IV	Кисти, предплечья, лодыжки	40	75	7,5

* За исключением женщин в возрасте до 30 лет.

** Дозы внешнего облучения рентгеновским излучением с эффективной энергией 15 ... 20 кэВ не должны превышать: 15 Р/год для всего тела и красного костного мозга лиц категории А; 0,5 Р/год — для лиц категории Б.

*** Для щитовидной железы детей и подростков моложе 16 лет установлен предел дозы 1,5 бэр/год.

Для каждой из этих категорий устанавливаются предельно допустимые дозы внешнего и внутреннего облучения (табл. 4.16). Различия в значениях предельно допустимых доз внешнего и внутреннего облучения для различных категорий облучаемых лиц обусловлены определенными требованиями. Так, к проведению работ с аппаратурой допускаются лица (категория А

группа 1), прошедшие предварительный медицинский контроль и не имеющие противопоказаний к работе с источниками излучений, а также прошедшие специальный курс обучения безопасным методам работы, правилам эксплуатации установок, личной гигиены и сдавшие техминимум.

Персонал, поступающий на постоянную работу на предприятия для выполнения дефектоскопических работ, подвергается обязательному медицинскому осмотру. Принятые на работу лица должны ежегодно проходить диспансеризацию. Более частые внеочередные медицинские осмотры проводятся по дозиметрическим и клиническим показателям. Все сведения о результатах медицинских осмотров заносятся в индивидуальные карты и хранятся в течение 30 лет после ухода с работы данного сотрудника. Оценка результатов предварительных и периодических медицинских осмотров и выдача по ним заключений на право работ с источниками излучений проводятся специализированными медицинскими учреждениями. Женщины на весь период беременности должны освобождаться от работ, связанных с воздействием ионизирующего излучения, а в период кормления грудью — от участия в аварийных работах. Лица моложе 18 лет к работам не допускаются.

Несмотря на то что предельно допустимая эквивалентная доза облучения оператора, непосредственно работающего с источниками ионизирующего излучения, составляет 5 бэр в течение года, необходимо принимать все меры для снижения этой дозы. Во всяком случае, суммарная доза облучения оператора (категория А) не должна превышать $D_0 = 5\ (N - 18)$, где N — возраст человека, годы; D_0 — доза, бэр. Таким образом, например, суммарная доза, накопленная лицом, работающим по категории А, к 30 годам не должна превышать 60 бэр.

Предельно допустимой годовой дозе 5 бэр при постоянной работе соответствует доза 100 мбэр/нед. При 36-часовой рабочей неделе это соответствует мощности дозы облучения 2,8 мбэр/ч. Мощность дозы при работе в неделю подсчитывается по формуле $D_0 = 100/t$.

При работе с источниками высокоэнергетического излучения возможны случаи повышенного (по сравнению с предельно допустимыми дозами) облучения обслуживающего персонала, что допускается нормами радиационной безопасности при необходимости спасения жизни людей, предотвращения крупных аварий и переоблучения людей. Повышенное облучение работающих связано, как правило, с использованием нестандартных установок, средств защиты, не отвечающих санитарным требованиям, с нарушением правил работы на эксплуатации источников высокоэнергетического излучения в условиях, не предусмотренных технической документацией, и пр.

Нормами радиационной безопасности в аварийных случаях

допускается облучение персонала, приводящее к превышению предельно допустимой дозы в 2 раза в течение года или в 5 раз на протяжении всего периода работы, при этом персонал должен быть предупрежден об опасности дополнительного облучения. Такое переоблучение персонала не разрешается в тех случаях: 1) если добавление планируемой дозы к накопленной превысит значение, рассчитанное по формуле $D_0=5(N-18)$; 2) если в течение предшествующих 12 мес работающий получил в результате однократного облучения дозу, превышающую полугодовую; 3) если работающий при аварии или случайном облучении ранее получил дозу, превышающую годовую в 5 раз; 4) если это женщина в репродуктивном возрасте.

При непланируемом однократном облучении дозой выше 25 Р работающий должен быть направлен на медицинское обследование. Все аварийные случаи, при которых обслуживающий персонал получил облучение более чем 25 Р, подлежат расследованию, необходимо выявление причин и принятие специальных мер, определяемых инструкциями, утвержденными Главным санитарно-эпидемиологическим управлением Министерства здравоохранения СССР.

Для своевременного выявления и предупреждения возможности внешнего или внутреннего переоблучения персонала должен быть организован систематический радиационный контроль. Контроль за радиационной безопасностью осуществляется специальной службой или компетентным лицом, выделенным для этих целей из числа сотрудников дефектоскопической лаборатории. Положение о службе радиационной безопасности, права и обязанности персонала или лица, ответственного за дозиметрический контроль, утверждаются администрацией предприятия по согласованию с местными органами санитарно-эпидемиологической службы. Персонал службы радиационной безопасности должен проходить специальную подготовку по промышленной дефектоскопии, дозиметрии и радиационной защите.

Предприятия, на которых проводятся работы, должны иметь необходимые *приборы для измерения мощности дозы излучения*, уровня *радиоактивной загрязненности* и *индивидуальные дозиметры*.

Объем и частота радиационного контроля устанавливаются администрацией учреждения в зависимости от характера и особенностей дефектоскопических работ. Радиационный контроль включает измерение мощности дозы излучения в основных и вспомогательных помещениях, на рабочих местах, измерение индивидуальных доз облучения лиц, занятых на основных и вспомогательных операциях, при выполнении дефектоскопических работ.

Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) является составной частью радиационного контроля, осуществляемого при

санитарно-гигиенической оценке условий труда персонала. Основной целью проведения ИДК является получение информации о дозах облучения персонала за определенный период времени. Данный контроль позволяет своевременно выявить и установить наличие источника повышенного уровня облучения персонала и предупредить его переоблучение.

Лица, ответственные за организацию и проведение радиационного контроля, должны знать основные положения нормативных документов, регламентирующих пределы облучения персонала, их допустимые и контрольные уровни.

При проведении ИДК могут быть использованы методы индивидуального контроля с помощью: ионизационных камер, фотопленок, термолюминесцентных дозиметров (LiF), экзоэмиссионных дозиметров, газоразрядных счетчиков. Эти методы классифицированы с учетом принципов измерения экспозиционных доз, видов регистрируемых излучений и областей использований ионизирующих излучений.

Общая характеристика наиболее распространенных методов индивидуальной дозиметрии приведена в [30].

Задачи

4.7.1. Проектная мощность P эквивалентной дозы как для рентгеновского, так и для нейтронного (тепловые нейтроны) излучения для лиц категории А составляет 1,4 мбэр/ч. Определить соответствующие уровни поглощенных доз при воздействии только рентгеновского (P_1) или только нейтронного (P_2) излучения.

Решение

Проектная мощность эквивалентной дозы

$$P = P_1 (k_к)_1 = P_2 (k_к)_2,$$

где $(k_к)_1 = 1$ и $(k_к)_2 = 3$ — соответственно безразмерные коэффициенты качества рентгеновского и нейтронного излучений (см. табл. 4.15). Поскольку 1 бэр$=(1\cdot10^{-2}$ Дж/кг$)/k_{iк} = (1\cdot10^{-2}$ Гр$)/k_к (i=1,2)$, то $P_1 = (1{,}4\cdot10^{-3}$ бэр/ч$)/ /k_{к1} = 1{,}4\cdot10^{-5}$ Гр/ч$=14$ мкГр/ч; $P_2 = (1{,}4\cdot10^{-3}$ бэр/ч$)/k_{к2} = 4{,}7\cdot10^{-6}$ Гр/ч$=$ $=4{,}7$ мкГр/ч.

4.7.2. Естественный фон излучения на багаже и человеке при полете на высоте 10 км создает мощность экспозиционной дозы $\dot{X} = 0{,}1$ мР/ч. Во сколько раз проектная мощность дозы $P_Б = 0{,}12$ мбэр/ч для ограниченной части населения (категория Б) больше мощности дозы от указанного естественного фона, если предположить, что поглощенная доза для биологических объектов связана с экспозиционной дозой соотношением D_0 (рад) $= 1$ (рад/Р)$\cdot X$(Р), и считать коэффициент качества фонового излучения равным единице.

Решение

$$\frac{P_Б}{P_ф} = \frac{0{,}12 \text{ мбэр/ч}}{(1 \text{ рад/Р})\,(0{,}1 \text{ мР/ч})}.$$

Поскольку 1 рад$=0{,}01$ Гр, то

$$\frac{P_Б}{P_ф} = \frac{0{,}12 \text{ мбэр/ч}}{0{,}1 \text{ мбэр/ч}} = 1{,}2.$$

Заключение

Рассмотренные в книге виды контроля имеют три объединяющих начала. Прежде всего в них используется единый носитель информации — электромагнитные излучения, и общие явления взаимодействия излучения с ОК (преломление, отражение, дифракция и т. д.) остаются справедливыми независимо от длины волны излучения. В области длин волн $\lambda \ll 1$ м можно создать узкие лучи и сформировать приемлемые по качеству изображения ОК, т. е. представить полезную информацию в виде, к которому наиболее приспособлена зрительная система человека. Наконец, изображения ОК, полученные в различных диапазонах длин волн, во многом сходны, и для их расшифровки применяют одинаковые алгоритмы выделения сигналов на фоне помех.

Радиоволновой контроль предпочтительно использовать для выявления нарушения сплошности в диэлектриках и определения их физико-механических свойств. Оптические методы незаменимы для контроля размеров и при оценке качества поверхности объектов. С помощью тепловых методов лучше всего выявляются нарушения сплошности в монокристаллах, они не имеют альтернативных вариантов при контроле теплофизических параметров ОК и дистанционном контроле низкотемпературных источников тепла. Радиационный контроль имеет неоспоримые преимущества при выявлении дефектов типа пор и включений в ОК, непрозрачных в других диапазонах излучений.

Развитие системы контроля излучениями идет по пути комплексного применения видов контроля, создания автоматических средств, передачи им функций управления технологическими процессами. Ведутся работы по формализации накопленных знаний по НК, и на этой основе начаты разработки автоматизированных информационно-справочных систем. Продолжается совершенствование технических характеристик аппаратуры, внедряются новые методы контроля, наблюдается тенденция расширения масштабов и областей применения традиционных средств НК излучениями.

Комплексирование видов контроля преследует цель получения более полной информации о контролируемом объекте. Комбинированные методы: оптико-радиоволновые, теплорадиоволновые, радиационно-тепловые и другие — позволяют ослабить недостат-

ки каждого отдельно взятого метода контроля. Однако при этом возникает проблема совместимости регистрируемых данных.

Совместить данные, полученные при различных способах контроля или во время контроля различных участков объекта в процессе производства или в различные периоды эксплуатации объекта, можно сопоставлением изображений, представленных в единых координатных системах. Объединение систем, реализующих различные методы НК, в единую сеть, способную к развитию путем подключения новых систем, позволит получить необходимую информацию о качестве промышленной продукции и прогнозировать ее надежность в процессе эксплуатации.

В настоящее время все острее стоит вопрос о повышении эффективности управления и интенсификации технологических процессов во всех отраслях промышленности. Особая роль здесь отведена автоматизированным системам управления технологическими процессами. В качестве источника информации в любой АСУ ТП выступает система автоматического контроля, позволяющая получить данные как о режимных параметрах процессов, так и о параметрах сырья, промежуточных и конечных продуктов. Эта система позволяет не только осуществить управление по показателям качества продукции, но и упростить алгоритмы и структуру АСУ ТП, уменьшить ее стоимость.

Остро стоит вопрос о создании автоматизированной информационно-справочной системы НК. Необходимость разработки такой системы обусловлена также непрерывным увеличением объемов информации по этому разделу науки и техники. По данным Госстандарта СССР, в 1989 г. потребности производства в информации о качестве выпускаемой продукции в 6...8 раз превышали объем данных, имеющихся на предприятиях.

Важные характеристики систем контроля излучениями — разрешающая способность и чувствительность. Они непосредственно влияют на надежность принятия решений о качестве ОК. Наиболее остро вопрос повышения разрешающей способности стоит в радиоволновом контроле. Ширина зондирующего луча определяется отношением размера антенны к длине волны.

В радиолокации разработаны методы, позволяющие увеличить (примерно в 100 раз) разрешение антенной системы применением так называемой синтезированной апертуры. С помощью методов выделения сигнала на фоне помех удается обнаружить более мелкие и менее контрастные дефекты в ОК, т. е. повысить чувствительность контроля. Используя микропроцессорную технику, можно реализовать указанные методы и в НК (см. кн. 5 данной серии).

Другим направлением совершенствования систем контроля излучениями служит разработка и внедрение новых методов, основанных на получении более полной информации об ОК. Среди них отметим томографию — метод визуализации сечений внут-

ренней структуры материала (см. кн. 5). Изображение строится в два этапа: 1) получение проекций ОК с различных направлений и 2) синтез изображения сечений в результате обработки проекций на ЭВМ. С появлением быстродействующих процессоров длительность этапа обработки уменьшилась до нескольких десятков секунд. С разработкой оптических процессоров появилась возможность восстанавливать томограммы по результатам зондирования ОК электромагнитным излучением в реальном масштабе времени и тем самым наметилась перспектива внедрения томографов в технологический процесс. Ведутся работы по созданию голографических томографов для получения трехмерных изображений внутренней структуры ОК (см. кн. 5).

Растут потребности в приборах для контроля состояния природной среды и экологической безопасности, определения качества сельскохозяйственной продукции, обнаружения болезней растительных покровов и др. Многие из них могут быть решены с помощью имеющихся методов и средств, разработанных для контроля промышленной продукции. Методы контроля излучениями наиболее пригодны для этих целей.

Развитие систем контроля излучениями направлено на то, чтобы вывести управление технологическими процессами на качественно новый уровень и улучшить среду обитания человека.

Список литературы

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: В 2-х кн. Кн. 1/Под ред. В. В. Ключева. — М.: Машиностроение, 1986. 488 с.
2. **Бутиков Е. И.** Оптика: Учеб. пособие для вузов/Под ред. Н. И. Калитеевского.— М.: Высшая школа, 1986. 512 с.
3. **Ванюрихин А. И., Герчановская В. П.** Оптико-электронные поляризационные устройства.— Киев: Техника, 1984. 160 с.
4. **Ключников А. С.** Радиооптика и голография. Учеб. пособие для вузов.— Минск: Изд-во Университетское, 1989. 224 с.
5. **Матвеев А. Н.** Оптика. Учеб. пособие для физ. спец. вузов. — М.: Высшая школа, 1985. 351 с.
6. **Ермолов И. Н., Останин Ю. Я.** Методы и средства неразрушающего контроля качества. — М.: Высшая школа, 1988. 368 с.
7. **Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов.— М.: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
8. **Конев В. А., Любецкий Н. В., Тиханович С. А.** Радиоволновая эллипсометрия диэлектрических структур.— Минск: Наука и техника, 1989. 133 с.
9. **Завьялов А. С., Дунаевский Г. Е.** Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах.— Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. 214 с.
10. **Козлов В. П., Вайнберг И. А., Приходько В. А.** Радиоволновой дефектоскоп СД-10АМ//Дефектоскопия. 1989. № 6. С. 91—92.
11. **Харвей А. Ф.** Техника сверхвысоких частот: В 2-х т.— М.: Сов. радио, 1965. 783 с.
12. **Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П.** Справочник по элементам волноводной техники.— М.: Сов. радио, 1967. 651 с.
13. **Гаврилин В. В., Григулис Ю. К., Пориньш В. М.** Электромагнитные радиоволновые приборы для контроля слоев полупроводниковых и металлических структур.— Рига: Зинатне, 1982. 162 с.
14. **Воробьев Е. А.** Экранирование СВЧ-конструкций.— М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
15. **Технологический** неразрушающий контроль пластмасс / А. И. Потапов, В. М. Игнатов, Ю. Б. Александров и др. — Л.: Химия, 1979. 288 с.
16. **Криксунов Л. З.** Справочник по основам инфракрасной техники.— М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
17. **Инфракрасные** излучатели/Т. Бураковский, Е. Гизинский. А. Саля: Пер. с польск.— Л.: Энергия.
18. **Аэро Э. Л., Томилин М. Г.** Применение жидких кристаллов для неразрушающего контроля оптических материалов, деталей и изделий. Обзор//Оптико-механическая промышленность. 1987. № 8. С. 50—59.
19. **Пресс Ф. П.** Формирование видеосигнала в приборах с зарядовой связью.— М.: Радио и связь, 1981. 130 с.
20. **Вычислительная** оптика. Справочник/М.М. Русинов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов и др.; Под ред. М. М. Русинова.— Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
21. **Буймистрюк Г. Я.** Построение видеоспектрометрических и спектрально-адаптивных телевизионных систем на базе акусто-оптических фильтров// Исслед. Земли из космоса, 1985. № 5. С. 67—75.

22. **Справочник** по приборам инфракрасной техники/Л. З. Криксунов, В. А. Волков, В. К. Вялов и др.; Под ред. Л. З. Криксунова. — Киев: Техніка, 1980. 232 с.
23. **Мирошников М. М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
24. **Вавилов В. П.** Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники.— М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
25. **Воронцов Л. Н., Корндорф С. Ф.** Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении.— М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
26. **Кучин А. А., Обрадович К. А.** Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности.— Л.: Машиностроение, 1981. 197 с.
27. **Воробьев В. А., Горшков В. А., Шеломанов А. Е.** Гамма-плотнометрия.— М.: Энергоатомиздат, 1989. 144 с.
28. **Неразрушающий** контроль с источниками высоких энергий/В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, Е. А. Гусев и др.— М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
29. **Промышленная** радиационная интроскопия / В. В. Клюев, Б. И. Леонов, Е. А. Гусев и др.— М.: Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
30. **Рентгенотехника.** Справочник: В 2-х кн./Под ред. В. В. Клюева.— М.: Машиностроение, 1980.— Кн. 1. 431 с. Кн. 2. 383 с.
31. **Румянцев С. В.** Радиационная дефектоскопия.— М.: Атомиздат, 1974. 512 с.
32. **Румянцев С. В., Штань А. С., Гольцев В. А.** Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля/Под ред. С. В. Румянцева.— М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
33. **Технические** средства медицинской интроскопии/Под ред. Б. И. Леонова.— М.: Медицина, 1989. 304 с.

Оглавление

Учебное издание

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

В пяти книгах

Епифанцев Борис Николаевич
Гусев Евгений Александрович
Матвеев Владимир Иванович
Соснин Феликс Рубенович

Книга 4. Контроль излучениями

Заведующий редакцией *В. И. Трефилов*
Редактор *Е. В. Вязова*
Мл. редактор *С. А. Пацева*
Художник *Ю. Д. Федичкин*
Художественный редактор *Т. М. Скворцова*
Технический редактор *Л. А. Муравьева*
Корректор *Р. К. Косинова*

ИБ № 9101

Изд. № РЭ-548. Сдано в набор 28.08.91. Подп. в печать 30.01.92. Формат 60×88$^1/_{16}$. Бум. офс. № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 20,58 усл. печ. л. 20,58 усл. кр.-отт. 21,64 уч.-изд. л. Тираж 5000 экз. Зак. № 1406

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 Министерства печати и массовой информации РСФСР, 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.

Рентгенотелевизионный микроскоп РИ-80Т

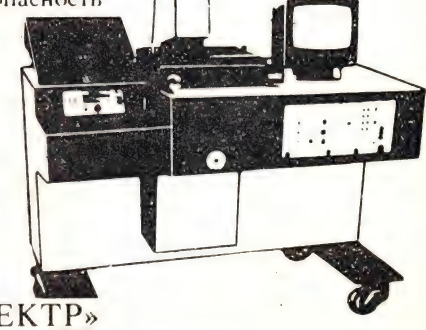
Применение

Контроль дефектности и геометрии внутренней структуры изделий микроэлектроники, радиодеталей, интегральных схем, сварных соединений из легких металлов, а также изделий из керамики, композитных материалов

Технические характеристики

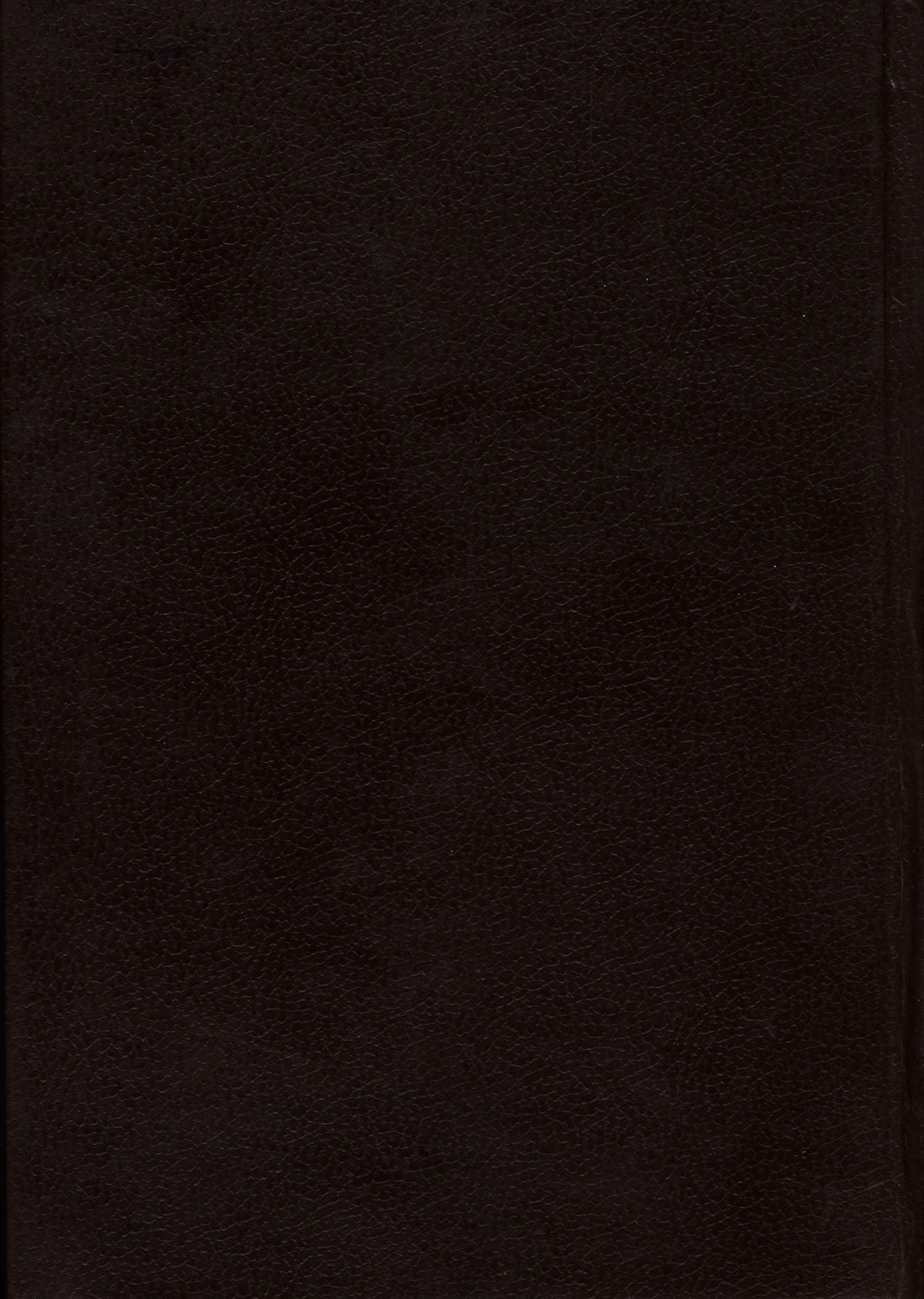
Напряжение на рентгеновской трубке, кВ .... 20 ... 100
Диаметр фокусного пятна, мкм 40
Диаметр рабочего поля, мм 90
Минимальный диаметр выявляемого контрастного одиночного объекта (вольфрамовая проволочка), мкм 20
Пространственное разрешение, пар лин./мм 3,5
Порог чувствительности по толщине объекта из алюминия, % 0,3
Максимальная толщина просвечиваемого объекта из алюминия, мм 30
Число накапливаемых на мишени рентгеновидикона кадров .... 2 ... 1000

- Новый уровень качества изображения
- Большое проекционное увеличение
- Высокое пространственное разрешение
- Электронное масштабирование изображения
- Полная радиационная безопасность
- Высокая экономичность



МНПО «СПЕКТР»

Московское научно-производственное объединение «Спектр»
119048, Москва, ул. Усачева, 35
Телефон: 245-57-92, телефакс: 2455070, телекс: 411554 RUBIN SU




4
Контроль излучениями
NDT